



COMUNE DI
LUOGOSANTO



REGIONE AUTONOMA
DELLA SARDEGNA



COMUNE DI
AGLIENTU

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE E L'ESERCIZIO DI UN IMPIANTO DI PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE EOLICA DENOMINATO "PARCO EOLICO LUOGOSANTO", DELLA POTENZA DI 95.2 MW, LOCALIZZATO NEL COMUNE DI LUOGOSANTO, E DELLE SOLE OPERE ED INFRASTRUTTURE CONNESSE PER IL COLLEGAMENTO IN ANTENNA 36 KV CON UNA NUOVA STAZIONE ELETTRICA (SE) DELLA RTN A 150 KV/36KV DA INSERIRE IN ENTRA-ESCE ALLA LINEA RTN A 150 KV "AGLIENTU-S. TERESA", SITA NEL COMUNE DI AGLIENTU.



Analisi degli effetti della rottura accidentale degli organi rotanti

PROPONENTE

MYT EOLO 1 S.R.L.
Via Vecchia Ferriera 22
36100 Vicenza (VI)
P.IVA 04436470241
REGISTRO IMPRESE VI-397007

PROGETTISTI

ING. CARLO PERUZZI
Via Pallone 6
37121 Verona (VR)
P.IVA 03555350234
PEC carlo.peruzzi@ingpec.eu



RENX ITALIA S.R.L.
Via Vecchia Ferriera 22
36100 Vicenza (VI)
P.IVA 04339940241
PEC: renx-italia@pec.it

DATA	REVISIONE

ELABORATO
RTS09

INDICE

1	DATI IDENTIFICATIVI DELLA SOCIETÀ PROPONENTE	3
2	RIFERIMENTO NORMATIVO PER LA REDAZIONE DEL PROGETTO	5
3	DESCRIZIONE GENERALE DEL SITO D'INTERVENTO	6
4	BASE DEI DATI CARTOGRAFICI, BIBLIOGRAFICI E SITOGRAFICI	10
4.1	DATI CARTOGRAFICI	10
4.1.1	Nazionale.....	10
4.1.2	Sovraregionale: Autorità di Bacino (https://autoritadibacino.regione.sardegna.it/).....	10
4.1.3	Regionale: GeoPortale Sardegna - https://www.sardegnameoportale.it/	11
4.2	DATI SITOGRAFICI	13
4.2.1	Sovraregionale e regionale	13
4.2.2	Provinciale	13
4.2.3	Comunale	13
4.2.4	Altri riferimenti sitografici	13
5	DESCRIZIONE SINTETICA DEI CONTENUTI DEL DOCUMENTO	14
5.1	TRAIETTORIE: LE FORZE CONSIDERATE	16
6	DESCRIZIONE SINTETICA DELLA STIMA DEGLI IMPATTI, DELLE MISURE DI MITIGAZIONE E COMPENSAZIONE E DEL MONITORAGGIO AMBIENTALE	17
7	CONSIDERAZIONI SULLE IPOTESI DI CALCOLO	19
8	RISULTATI DI CALCOLO	23
8.1	RAPPRESENTAZIONE CASO 1 E CASO 2	23
8.1.1	Caso 1 – Gittata delle pale per la velocità nominale del rotore (10,00 giri/min).....	23
8.1.2	Caso 2 - Gittata delle pale per la massima velocità del rotore con riduzione del 30% (8,12 giri/min)	25
8.2	VALUTAZIONE DEL WORST CASE	28
8.3	VALUTAZIONE DEL REAL CASE	29
8.4	STRADE	30
9	CONCLUSIONI	36

1 DATI IDENTIFICATIVI DELLA SOCIETÀ PROPONENTE

La società **Myt Eolo 1 S.r.l.**, d'ora in avanti indicata sinteticamente come il “**Proponente**”, ha elaborato il presente progetto per la produzione di energia rinnovabile da fonte eolica ubicato nel comune di Luogosanto, le cui opere ed infrastrutture connesse per il collegamento alla Rete di Trasmissione Nazionale (di seguito RTN) ricadono nei comuni di Luogosanto e Aglientu.

Il titolo completo del progetto è il seguente: “**Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica denominato “Parco Eolico Luogosanto”, della potenza di 95,2 MW, localizzato nel Comune di Luogosanto e delle sole opere ed infrastrutture connesse per il collegamento in antenna 36kV con una nuova Stazione Elettrica (SE) della RTN a 150kV/36kV da inserire in entra - esce alla linea RTN a 150kV “Aglientu - S. Teresa”, sita nel Comune di Aglientu**”.

Di seguito, i dati identificativi sintetici del Proponente:

- Società Proponente: MYT EOLO 1 S.r.l.
- Forma Giuridica: Società a Responsabilità Limitata
- Presidente del CdA: SICCARDI IGOR
- Sede: Via Vecchia Ferriera, 22 – 36100 – VICENZA (VI)
- Posta certificata: myteolo1srl@pec.it
- REA: VI - 404143
- P.IVA: 04436470241
- Iscritta alla Sezione Ordinaria di VICENZA

Il Proponente è parte del gruppo **Renx Italia S.r.l.**, società di diritto italiano avente ad oggetto lo studio, la compravendita, la costruzione, la gestione e la commercializzazione di impianti di produzione di energia rinnovabile, tra cui spicca nella fattispecie la fonte eolica.

Renx Italia S.r.l. nasce dalla comune visione dei soci fondatori di creare un'entità altamente specializzata nella progettazione e nell'ambito della produzione di energia da fonti rinnovabili. Affidandosi ad un team multispecialistico comprendente oltre quaranta tra collaboratori e consulenti che quotidianamente operano con professionalità e competenze nella ricerca e nello sviluppo delle nuove iniziative del gruppo, ad oggi, Renx Italia S.r.l. è, nel segmento delle piccole e medie imprese, uno degli operatori qualificati che opera con fondi e grandi compagnie energetiche con la maggiore pipeline di sviluppo di progetti a fonti rinnovabili.

La forte espansione del gruppo, dalla sua nascita ad oggi, trae origine indubbiamente dalle competenze e dalle esperienze in ambito energetico acquisite nel corso degli anni della proprietà, abbinata a valori etici, varietà di competenze multiculturali, gestione imprenditoriale e forte orientamento ai risultati di un gruppo di lavoro giovane, motivato e appassionato dal settore delle energie rinnovabili.

L'ipotesi progettuale prevede l'installazione di n. 14 aerogeneratori della potenza nominale di 6,8 MW per una potenza complessiva di impianto pari a 95,2 MW nel comune di Luogosanto (di seguito "**Parco eolico Luogosanto**").

Secondo quanto previsto dalla Soluzione Tecnica Minima Generale (**STMG**) ricevuta ed accettata dal Proponente in qualità di titolare dei diritti del progetto di cui al **Codice Pratica 202201369**, Terna S.p.A. prevede che il "**Parco Eolico Luogosanto**" venga collegato in antenna 36kV con una nuova Stazione Elettrica (SE) della RTN a 150/36kV da inserire in entra – esce alla linea RTN a 150kV "Aglientu – S. Teresa", previa realizzazione dei seguenti interventi previsti dal Piano di Sviluppo Terna:

- nuova Stazione Elettrica (SE) della RTN a 150kV in GIS denominata "Buddusò";
- nuova Stazione Elettrica (SE) della RTN a 150kV denominata "Santa Teresa";
- nuova Stazione Elettrica (SE) della RTN a 150kV in GIS denominata "Tempio";
- nuovo elettrodotto di collegamento della RTN a 150kV tra la SE Santa Teresa e la nuova SE Buddusò.

E' giusto precisare che le opere "SE RTN" sopra citate non appartengono alla presente progettazione.

Internamente al parco eolico, i singoli aerogeneratori saranno collegati mediante cavidotto interrato a 30kV alla Sottostazione Elettrica di condivisione e trasformazione 30/36kV di proprietà dell'utenza dalla quale partirà il cavidotto interrato 36kV che, seguendo per quanto più possibile il tracciato stradale esistente, veicherà l'energia prodotta dal Parco Eolico per la connessione in antenna 36kV con la nuova Stazione Elettrica (SE) della RTN a 150kV/36kV da inserire in entra-esce alla linea RTN a 150kV "Aglientu-S. Teresa" di cui alla STMG, sita nel comune di Aglientu, che rappresenta il punto di connessione dell'impianto alla RTN.

2 RIFERIMENTO NORMATIVO PER LA REDAZIONE DEL PROGETTO

Il presente documento appartiene al progetto di fattibilità tecnica ed economica (PFTE) allegato all'istanza di procedura V.I.A. (artt. 23, 24, 24bis e 25 del d.Lgs. n° 152/2006 e ss. mm. e ii.) inerente al **“Progetto per la realizzazione e l’esercizio di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica denominato “Parco Eolico Luogosanto”, della potenza di 95,2 MW, localizzato nel Comune di Luogosanto e delle sole opere ed infrastrutture connesse per il collegamento in antenna 36kV con una nuova Stazione Elettrica (SE) della RTN a 150kV/36kV da inserire in entra - esce alla linea RTN a 150kV “Aglientu - S. Teresa”, sita nel Comune di Aglientu”**.

L'intero progetto, come richiesto dalla procedura di V.I.A. , è stato elaborato in ottemperanza a quanto richiesto per un livello di **“fattibilità tecnica ed economica”** secondo il recente d.Lgs. 31 marzo 2023, n. 36 - Codice dei contratti pubblici in attuazione dell'articolo 1 della legge 21 giugno 2022, n. 78, recante delega al governo in materia di contratti pubblici - (G.U. n. 77 del 31 marzo 2023 - S.O. n. 12).

Da questo momento in poi e per tutti gli elaborati progettuali, qualsiasi riferimento di legge o norma s'intenderà già comprensivo della dicitura “ss. mm. e ii.”.

3 DESCRIZIONE GENERALE DEL SITO D'INTERVENTO

Il parco eolico di progetto si sviluppa nella fascia di territorio della Gallura posizionato mediamente a circa 6,5 km in direzione nord-est rispetto al centro abitato del comune di Luogosanto, in posizione ovest rispetto al fiume Liscia e ad una altezza sul livello del mare che varia dai 40 ai 175 metri s.l.m.m.

Il territorio interessato dall'intervento è inserito all'interno del comune di Luogosanto, posto a sud del centro abitato della frazione Bassacutena del comune di Tempio Pausania, confinante a nord con Santa Teresa di Gallura, a sud con Luras, ad est con Arzachena e ad ovest con Aglientu.

Il parco eolico è composto complessivamente da n° 14 turbine.

Un primo gruppo è composto da n° 2 turbine (identificabili con i codici: **L_01** ed **L_02**) e sono ubicate in località Santu Jaccu, in posizione ovest rispetto alla S.S. n° 133. Il secondo gruppo è composto da n° 12 aerogeneratori (identificabili con i codici da **L_03** a **L_14**) sono localizzate tra le frazioni Nibbareddu e Lu Mocu, in posizione est rispetto alla stessa S.S. n° 133.

Nelle successive **figure**, si propone il layout dell'intero intervento e degli stralci del solo parco eolico.

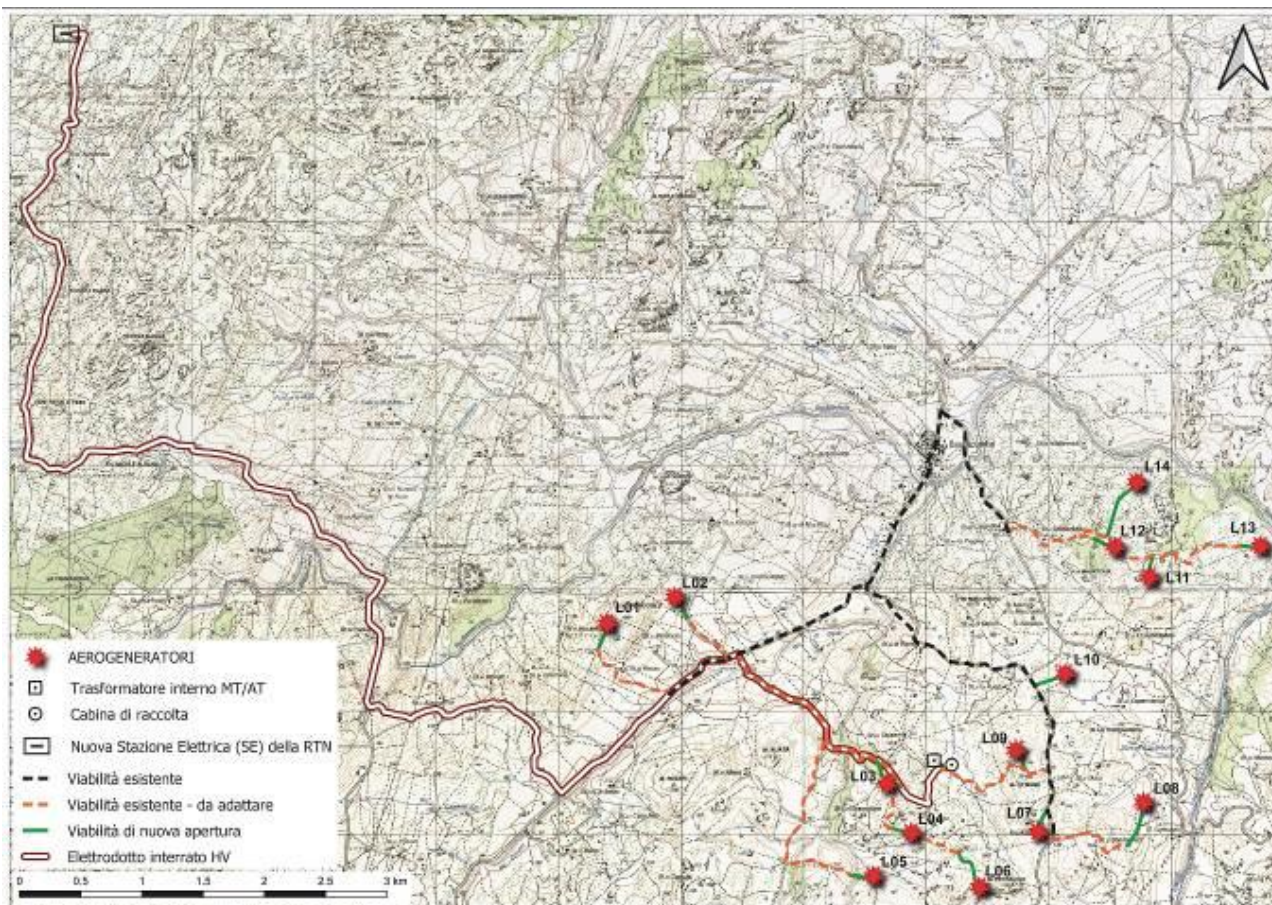


Figura 1. Individuazione dell'intero intervento su base cartografica DGBT

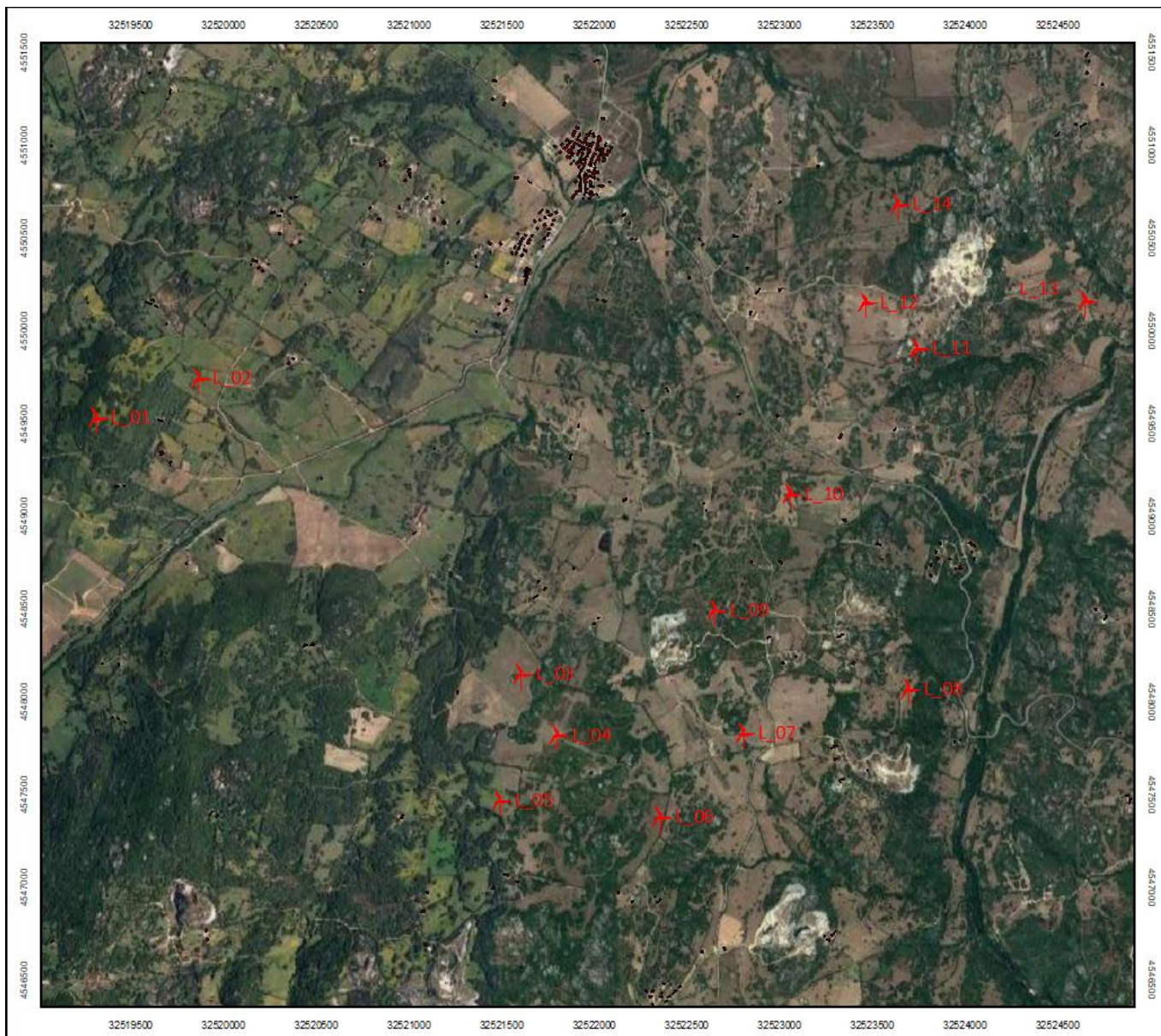


Figura 2. Stralcio del solo parco eolico su base ortofotografica

Di seguito, invece, le coordinate per l'individuazione dei singoli aerogeneratori:

Identificativo degli aerogeneratori	Comune	Coordinata UTM Nord	Coordinata UTM Est
L_01	Luogosanto	4549532.00	519312.00
L_02	Luogosanto	4549745.71	519865.02
L_03	Luogosanto	4548224.17	521599.48
L_04	Luogosanto	4547824.48	521797.06
L_05	Luogosanto	4547471.16	521487.65
L_06	Luogosanto	4547382.49	522353.81
L_07	Luogosanto	4547833.09	522831.19
L_08	Luogosanto	4548072.30	523695.44
L_09	Luogosanto	4548497.40	522652.10
L_10	Luogosanto	4549123.40	523054.99
L_11	Luogosanto	4549906.80	523740.64
L_12	Luogosanto	4550154.91	523462.18
L_13	Luogosanto	4550162.21	524649.83
L_14	Luogosanto	4550682.03	523637.89

Tabella 1. Coordinate aerogeneratori Parco Eolico Luogosanto, in formato UTM

La rete stradale appare ben articolata sulla dorsale della S.S. n° 133 "Palau" e della S.P. n° 115.

La viabilità interna del parco è ben collegata rispetto alle due sopracitate dorsali.

L'elettrodotto di collegamento alla nuova Stazione Elettrica (SE) della RTN (150kV/36kV) si sviluppa, mediante cavidotto interrato a 36kV, lungo una strada interna esistente fino alla S.S. n° 133 e poi da questa, sempre attraverso dei collegamenti esistenti, raggiunge la cabina di consegna Terna 36kV/150kV in Comune di Aglientu.

Dall'esame dell'elaborato "**SCGG - Studio di Compatibilità Geologica e Geomorfologica**", allegato alla presente progettazione, emerge quanto segue:

"Da un punto di vista geologico il territorio in esame appartiene unicamente al complesso intrusivo tardo - ercinico che si estende fra la Sardegna nord orientale e la Corsica e denominato "**Batolite Sardo - Corso**". Il complesso granitoide risulta iniettato da manifestazioni filoniane acide o basiche, tardo erciniche, orientate secondo la direttrice principale **SSW - NNE** analogamente alle principali faglie cartografate nell'area. Secondo le Note Illustrative della **Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 "Foglio 428 - Arzachena"**, l'insieme dei dati petrografici e strutturali permettono di definire singole unità intrusive caratterizzate ognuna da geometria, aspetti composizionali e strutturali propri, e contraddistinte dalla cronologia relativa di messa in posto, deducibile dall'analisi dei contatti tra differenti litofacies delle diverse unità intrusive. I depositi quaternari olocenici, di origine alluvionale, detritica ed eluvio - colluviale, non raggiungono mai estensioni superficiali e potenze tali da renderli prevalenti, seppure localmente, rispetto alle formazioni paleozoiche. Nei dintorni dell'area di indagine, tra i più significativi depositi alluvionali si segnalano quelli lungo il **fiume Liscia**, ad est degli aerogeneratori in progetto, mentre gli affioramenti di coltri eluvio - colluviali sono ben rappresentati nelle ampie aree sub - pianeggianti di **Bassacutena** nel contiguo comune di **Tempio Pausania**, a nord o ad ovest degli aerogeneratori in progetto. Infine, si riscontra la presenza di coperture terrigene antropiche associate all'estrazione del granito (discariche minerarie).

4 BASE DEI DATI CARTOGRAFICI, BIBLIOGRAFICI E SITOGRAFICI

4.1 DATI CARTOGRAFICI

4.1.1 Nazionale

Istituto Geografico Militare (I.G.M.)

L'Istituto geografico militare (IGM) ha il compito di fornire supporto geotopografico alle Unità e ai Comandi dell'Esercito italiano. L'istituto svolge le funzioni di ente cartografico dello Stato ai sensi della Legge n. 68 in data 2 febbraio 1960 ed opera alle dipendenze del Comando Militare della Capitale. (<https://www.igmi.org/>).

In particolare, sono state utilizzate le seguenti:

- **Carta Topografica d'Italia – scala 1:50.000 – Foglio n° 427 - Luogosanto – Serie 50**
- **Carta Topografica d'Italia – scala 1:25.000 – Foglio n° 427 – Sezione I – Luogosanto – Serie 25**
- **Carta Topografica d'Italia – scala 1:25.000 – Foglio n° 427 – Sezione I – Bassacutena – Serie 25**

Progetto CARG

Alla fine degli anni '80, prende il via il Progetto di realizzazione della cartografia geologica nazionale alla scala 1:50.000, inizialmente nell'ambito del Programma annuale di interventi urgenti di salvaguardia ambientale (L. 67/88), poi nella Programmazione triennale per la tutela dell'ambiente (L. 305/89), grazie allo stanziamento di risorse dedicate che hanno dato così inizio al Progetto CARG (CARTografia Geologica). Il Progetto è svolto in collaborazione con le Regioni e le Province autonome, con il CNR e le Università ed è coordinato dal Servizio Geologico d'Italia in qualità di organo cartografico dello Stato (L. 68/60). Il Progetto CARG prevede la realizzazione e l'informatizzazione dei 636 fogli geologici e geotematici alla scala 1:50.000 che ricoprono l'intero territorio nazionale. (<https://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/cartella-progetti-in-corso/suolo-e-territorio-1/progetto-carg-cartografia-geologica-e-geotematica>)

4.1.2 Sovraregionale: Autorità di Bacino (<https://autoritadibacino.regione.sardegna.it/>).

Il Piano di bacino/distretto idrografico è lo strumento conoscitivo, normativo e tecnico-operativo mediante il quale sono pianificate e programmate le azioni e le norme d'uso finalizzate alla conservazione, alla difesa, alla valorizzazione e alla corretta utilizzazione del suolo e delle acque, sulla base delle caratteristiche fisiche e ambientali dei territori interessati. Esso rappresenta il quadro di riferimento a cui devono adeguarsi e riferirsi tutti i provvedimenti autorizzativi e concessori inerenti agli interventi comunque riguardanti il bacino e ha valore di piano territoriale di settore.

Il Piano di bacino può essere redatto e approvato anche per sottobacini o per stralci relativi a settori funzionali. Contenuti specifici e obiettivi del Piano di bacino sono definiti dall'art. 65 del d.Lgs. n° 152/2006.

La Sardegna è considerata, ai sensi dell'art. 64 del d.Lgs n° 152/2006 un unico distretto idrografico e gli stralci funzionali del Piano approvati e vigenti sono riportati di seguito:

- Piano stralcio di bacino per l'assetto idrogeologico (**PAI**)
- Piano di tutela delle acque
- Piano stralcio di bacino per l'utilizzo delle risorse idriche (**PSURI**)
- Nuovo Piano regolatore generale degli acquedotti
- Piano stralcio delle fasce fluviali (**PSFF**)
- Piano di gestione del distretto idrografico
- Piano di gestione del rischio alluvioni (**PGRA**)
- In particolare, il riferimento principale per le aree a pericolosità/rischio idrogeologico è costituito dalle Norme Tecniche di Attuazione (**NTA**) del Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico (**PAI**) - Testo coordinato aggiornato con le modifiche approvate dal comitato istituzionale dell'Autorità di bacino con deliberazione n. 15 del 22 novembre 2022

4.1.3 Regionale: GeoPortale Sardegna - <https://www.sardegna.geoportale.it/> E' il riferimento principale per quasi tutti gli aspetti di interesse.

Il Geoportale è il luogo di accesso a diverse informazioni geografiche sulla regione, come richiesto dalla Direttiva europea INSPIRE (Direttiva 2007/2/CE del Parlamento Europeo). Nella preparazione della documentazione del progetto sono state utilizzate principalmente tre aree del geoportale:

- **Navigatori:** attraverso i navigatori, la Regione Sardegna fornisce strumenti per la visualizzazione online dei dati cartografici. Con l'applicazione SardegnaMappe sono state utilizzate e scaricate le mappe disponibili, i metadati e i dati cartografici necessari. Ad esempio, il layer "Sardegna Mappe Aree Tutelate" disponibile sul geoportale è stato utilizzato per preparare il set di mappe "Aree non idonee" necessarie per la presentazione della domanda VIA.
- **Accesso ai dati:** consente di accedere al catalogo dei dati geografici forniti dall'amministrazione regionale. Questi possono essere consultati attraverso il seguente servizio: Catalogo del Geoportale. Vengono estratti dati raster (ad esempio la mappa Ortofoto) o vettoriali come Aree non idonee. La procedura per scaricare la maggior parte dei dati scaricati si basa sulla selezione dei dati raster o vettoriali di interesse (si trovano nella barra di sinistra del desktop di Sardegna Mappe), cliccando sul tasto destro del mouse, quindi sull'icona dentata e ottenendo l'accesso diretto al download dei dati. Per la preparazione delle mappe sono stati utilizzati due moduli: WMS cioè una forma di database o shp cioè un pacchetto di file scaricati direttamente sul nostro computer.
- **Aree tematiche:** insieme di dati geografici, raggruppati per area tematica. Per facilitare il download, sono disponibili in pacchetti zippati.

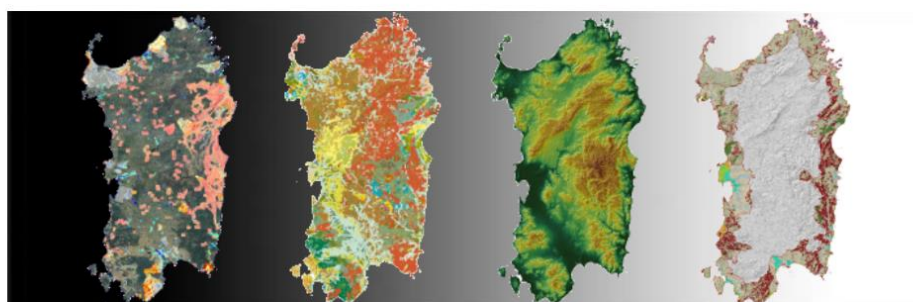
Proprio dal menu a tendina "**Aree Tematiche**" è disponibile la seguente documentazione:

sardegna geoportale / aree tematiche

AREE TEMATICHE

Carta tecnica regionale
Database Geotopografico (DBGT)
Modelli digitali terreno e superficiali
Carte tematiche regionali
Pianificazione
Aree tutelate
Catasto
Limiti amministrativi
Beni culturali

Aree tematiche



Per facilitare il download, alcune categorie di dati geografici, raggruppati per aree tematiche, sono disponibili anche come pacchetti compressi.

Tra le tante cartografie di base disponibili è stato utilizzato il Database (DBGT) che è una carta topografica della regione Sardegna contenente informazioni geometriche e alfanumeriche su strade, edifici, idrografia, orografia, vegetazione e toponomastica. Questa carta ha più componenti ed elementi rispetto alla CTR classica. È stata utilizzata quando era necessario mostrare i dettagli sull'urbanizzazione e sulle strade, sulla vegetazione o sull'idrografia, ad esempio in tutte le carte dell'Inquadramento Catastale e delle Aree non Idonee. Durante la creazione delle mappe per la documentazione, è stata utilizzata per mostrare una rappresentazione rappresentativa della situazione reale, come ad esempio l'estensione dei lavori e il percorso dei cavi elettrici, o nella pianificazione urbana. In questi casi, non è importante modificare le proporzioni degli elementi, quindi oggetti come edifici e strade sono rappresentati con la forma reale del loro perimetro visto dall'alto, piuttosto che sostituirli con simboli convenzionali.

È stato utilizzato il formato “2022_DBG_T10K” perché è il database più aggiornato disponibile. La scala più comunemente utilizzata è stata 1:10.000, come raccomandato.



4.2 DATI SITOGRAFICI

4.2.1 Sovraregionale e regionale

I riferimenti consultabili sono i seguenti:

- Regione Sardegna: <https://www.regione.sardegna.it/>
- ARPA Sardegna: <http://sardegnaambiente.it/arpas/>
- <https://www.sardegnaambiente.it/>
- <https://sardegnaenergia.regione.sardegna.it/>

4.2.2 Provinciale

I riferimenti consultabili sono i seguenti:

- Provincia di Sassari: <https://www.provincia.sassari.it/index.php> (in teoria soppressa a seguito della L.R. n° 24 del 15 aprile 2021)
- Città Metropolitana di Sassari: al momento non esistono riferimenti (in teoria istituita con L.R. n° 24 del 15 aprile 2021)
- Provincia della Sardegna Est: al momento non esistono riferimenti (in teoria istituita con L.R. n° 24 del 15 aprile 2021)

4.2.3 Comunale

I riferimenti consultabili sono i seguenti:

- https://www.sardegnaeoportale.it/webgis2/sardegnamappe/?map=monitoraggio_strumenti_urbanistici
- http://webgis.regione.sardegna.it/puc_serviziconsultazione/ElencoComuni.ejb.
- Comune di Luogosanto: <https://www.comuneluogosanto.ss.it/>
- Comune di Aglientu: <https://comune.aglientu.ot.it/index.php>

4.2.4 Altri riferimenti sitografici

I riferimenti consultabili sono i seguenti:

- **Gazzetta Ufficiale, Ministero dello Sviluppo Economico, Decreto 10 settembre 2010, *Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili. (10A11230)* (GU Serie Generale n.219 del 18-09-2010):**
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2010/09/18/10A11230/sg>
- Regione Autonoma della Sardegna, Delibera del 27 novembre 2020, n. 59/90, *Individuazione delle aree non idonee all'installazione di impianti alimentati da fonti energetiche rinnovabili:*
https://delibere.regione.sardegna.it/it/visualizza_delibera.page;jsessionid=CB94BE8C159752C700D098227D0963E4.app4?contentId=DBR53435
- <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/64735.pdf>

5 DESCRIZIONE SINTETICA DEI CONTENUTI DEL DOCUMENTO

La presente analisi consiste nella valutazione della distanza massima dall'aerogeneratore entro la quale, in presenza di una eventuale ed accidentale rottura degli elementi rotanti, il distacco di una parte della pala possa rappresentare un rischio. Seppur tale rischio sia remoto, soprattutto considerando i moderni aerogeneratori i quali, ruotando a velocità meno sostenuta rispetto al passato, garantiscono un maggior grado di sicurezza, sarà comunque considerato come una eventualità ai fini di garantire la massima sicurezza dell'intervento proposto. Le pale, infatti, qualora sottoposte a particolari condizioni di stress principalmente dovute ad una non corretta manutenzione e cura che il gestore dell'impianto si impegnerà a garantire secondo i migliori standard proposti dal fornitore delle macchine, potrebbero accidentalmente essere strappate dalla loro sede e lanciate a terra. La traiettoria dipende: dall'energia cinetica al momento del rilascio, dalle proprietà aerodinamiche dell'elemento e dalle sue dimensioni e dal punto della circonferenza di rotazione da cui si stacca, dall'altezza del rotore.

Nel presente elaborato si adopereranno delle semplificazioni necessarie per ottenere risultati sui quali effettuare le necessarie considerazioni come, ad esempio, tralasciare nel calcolo i contributi aerodinamici delle parti componenti. Tener conto di questi ultimi significherebbe considerare un numero significativo di variabili come, tra le tante, la pala che viene lanciata sia in termini di massa sia in termini di contributi aerodinamici oltre a dover fissare le condizioni di vento all'atto della rottura, la distribuzione delle velocità lungo il pezzo staccato e la distribuzione delle velocità del vento lungo la traiettoria. È vero che i contributi aerodinamici potrebbero aumentare il tempo di volo e, quindi, la gittata, ma è anche vero che, per compensare, non verrà tenuto conto della presenza dell'aria che genera comunque delle forze di resistenza viscosse le quali, agendo sulla superficie della pala, ne riducono tempo di volo e distanza.

Per tenere conto della resistenza che il materiale della pala esercita durante la frattura (superiore al carico critico) e della resistenza aerodinamica della pala durante il movimento nell'aria (proporzionale al quadrato della velocità stessa), è possibile ipotizzare una riduzione della velocità tangenziale della pala pari al 30% al momento della frattura.

Non essendo ancora presente un riferimento normativo specifico sul tema, e stante le notevoli approssimazioni circa la variabilità di un evento remoto ma che, per scongiurare ogni possibile rischio o rischio potenziale, il presente elaborato è chiamato a relazionare, si è deciso di optare per una riduzione del 30% dalla velocità massima del rotore, tenendo conto di vari fattori tra i quali la resistenza esercitata dal materiale della pala durante la rottura (superiore al carico critico) e la resistenza aerodinamica della pala durante il movimento in aria (proporzionale al quadrato della velocità stessa).

Nel seguente documento analizzeremo 2 casi:

Caso 1 - Rottura della pala alla velocità nominale del rotore (10,00 rpm)

- Distacco netto ed istantaneo della pala nel punto di giunzione con il rotore,
- Sistema con 3 livelli di prestazioni,
- Centro di gravità della pala a una distanza pari a 1/3 della lunghezza complessiva della pala,
- Velocità di rotazione a velocità nominale del rotore.

Caso 2 - Rottura delle pale per la massima velocità del rotore con una riduzione del 30% (8,12 rpm)

- Distacco netto e istantaneo della pala nel punto di giunzione con il rotore,
- Riduzione del 30% della velocità tangenziale della pala,
- Sistema con 3 livelli di prestazioni,
- Centro di gravità della pala a una distanza pari a 1/3 della lunghezza complessiva della pala,
- Velocità massima di rotazione del rotore.

Le pale dell'aerogeneratore sono fissate al mozzo e vi è un sistema di controllo che ne modifica costantemente l'orientamento rispetto alla direzione del vento (cosiddetto *sistema di imbardata*), per offrire allo stesso sempre il medesimo profilo alare garantendo, indipendentemente dalla direzione del vento, il miglior angolo di attacco.

L'accidentale rottura degli organi rotanti è strettamente correlata alle caratteristiche dell'aerogeneratore nella fattispecie, che vengono riassunte nella seguente **tabella 1**:

Potenza nominale aerogeneratore	6,8 MW
Altezza torre al mozzo	118 m
Diametro Rotore	163 m
Lunghezza della pala	79,7 m
Area spazzata dalle pale	20.867 m ²
Velocità di rotazione massima del rotore, a regime	11,6 rpm
Cut-in wind speed	3 m/s
Cut-out wind speed	26 m/s

Tabella 2. Caratteristiche Tecniche Aerogeneratore di progetto

Le modalità di rottura della pala possono essere assai diverse. Essendo un organo in rotazione è soggetto alla forza centripeta che va equilibrata con l'azione della struttura della torre stessa. Per minimizzare tale forza, la pala è costruita in materiale leggero; nel caso di specie, le pale sono costituite da più strati di vetroresina.

Detto che le variabili possono essere molteplici, la maggiore probabilità di un evento di rottura accidentale di un organo rotante è del tipo "Rottura alla Radice".

5.1 TRAIETTORIE: LE FORZE CONSIDERATE

La determinazione delle forze che agiscono sulle pale a causa di una rottura istantanea durante il moto rotazionale è cosa complessa.

Anzitutto, la traiettoria è determinata principalmente dall'angolo di lancio e dall'inerzia che agisce sull'elemento. L'unica forza inerziale agente in questo caso è la forza di gravità. La durata del volo considerato è determinata considerando la velocità iniziale applicata al centro di gravità. Il tempo risultante è usato per calcolare la distanza orizzontale (gittata) nel piano e fuori dal piano. La gittata è determinata dalla velocità orizzontale al momento del distacco.

Senza considerare le caratteristiche aerodinamiche insite della struttura delle pale, la gittata massima derivante dal distacco della pala si avrebbe in corrispondenza della posizione a 45° e di moto "a giavellotto" del componente. Nel caso reale, la pala ha una complessità aerodinamica tale per cui il verificarsi di queste condizioni è praticamente impossibile: le forze di resistenza viscosa, le azioni del vento ed il moto di rotazione complesso dovuto al profilo aerodinamico della pala, si oppongono al moto riducendone tempo e distanza di volo.

6 DESCRIZIONE SINTETICA DELLA STIMA DEGLI IMPATTI, DELLE MISURE DI MITIGAZIONE E COMPENSAZIONE E DEL MONITORAGGIO AMBIENTALE

Il distacco di una pala completa dal rotore dell'aerogeneratore può essere determinato dalla rottura della giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo.

Le pale sono costituite da una parte strutturale, chiamata longherone, posizionata all'interno della pala e da una parte esterna (guscio) che viene modellato al fine di garantire la massima spinta aerodinamica. Le due componenti sono unite fra loro mediante incollaggio e, alla fine del processo produttivo, costituiscono un corpo unico.

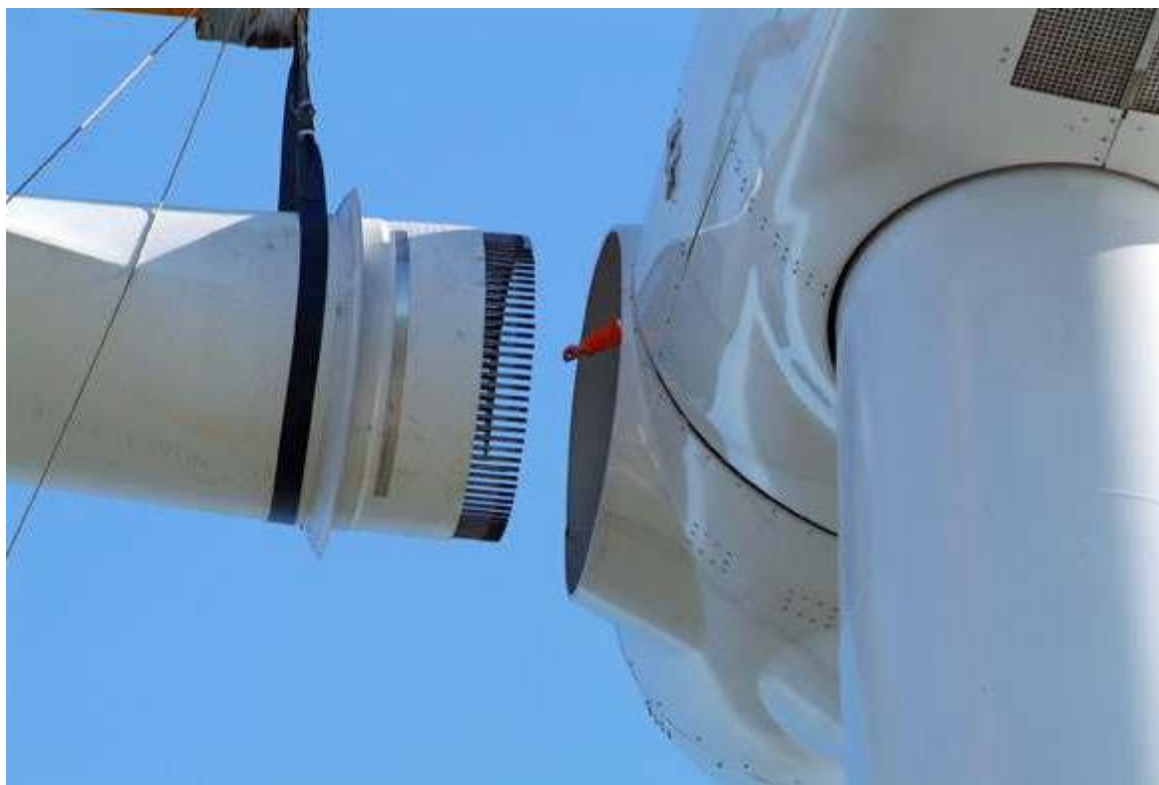


Figura 3. Operazione di collegamento della pala al mozzo. Sono chiaramente visibili i filetti di giunzione

Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni (prigionieri) opportunamente serrati durante le operazioni di assemblaggio della turbina. Il carico conferito ai prigionieri durante il serraggio è determinante sulla resistenza dei prigionieri stessi alla fatica, per questo motivo sono previste verifiche di controllo durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina. La mancata o errata verifica del serraggio può determinare una plausibile riduzione del carico che, in particolari circostanze di incuria, possono portare danni al funzionamento stesso della turbina in termini di rotazione, fino anche alla rottura dei bulloni e al distacco dell'organo rotante.

Per la stima della gittata massima dell'intera pala si impongono alcune ipotesi semplificative:

- distacco netto ed istantaneo di una intera pala alla sua radice;
- assenza di attriti viscosi durante il volo;
- distacco alla rotazione massima di funzionamento;
- vento presente durante tutto il volo della pala con velocità corrispondente alla velocità massima di funzionamento;
- assenza di effetti di "portanza" del profilo alare.

Il moto considerato è di tipo rotazionale, cioè quello fisicamente più probabile. Non viene considerata la possibilità, puramente teorica, che il corpo assuma una traiettoria "a giavellotto".

Inoltre, ponendosi nelle condizioni peggiori possibili (Worst Case) e come precedentemente illustrato, viene trascurata la presenza dell'aria che, nella realtà, genera forze di resistenza al moto che ne ridurrebbero tempo di volo e distanza di caduta.

7 CONSIDERAZIONI SULLE IPOTESI DI CALCOLO

Generalizzando per un attimo il problema, dunque considerando la pala non come un sistema puntiforme, le equazioni del moto che ne determinano la relativa legge sono le seguenti:

$\begin{cases} m \cdot a = F \\ I \frac{d\omega}{dt} \end{cases}$	Equazione 1
---	-------------

Dove:

- m è la massa [kg],
- a è l'accelerazione [m/s^2],
- I è il momento d'inerzia [$kg \cdot m^2$],
- ω è la velocità angolare [rad/s].

Le equazioni riportate nel sistema **dell'Equazione 1**, che risultano essere rispettivamente la prima e la seconda legge della dinamica, ci permettono di affermare che:

- il corpo segue una traiettoria determinata dalla posizione del baricentro e dalle forze agenti sul corpo;
- il corpo, durante la traiettoria precedentemente determinata, gira indisturbato intorno al suo asse principale d'inerzia con una velocità angolare pari a quella iniziale, non influenzando sulla traiettoria che esso compie.

Tali considerazioni sono state effettuate al fine di garantire la validità dell'approssimazione di sistema a 3 gradi di libertà ("3 g.d.l.") precedentemente effettuata per il calcolo della gittata.

Sulla base delle ipotesi di cui al paragrafo 6 "**Traiettorie: le forze considerate**", in particolar modo alla ipotesi di sistema puntiforme con 3 g.d.l., è possibile associare al problema in questione il modello generale per studiare i fenomeni dei corpi che vengono lanciati con un angolo di alzo obliquo, con una velocità costante (a causa della mancanza della resistenza aerodinamica) e che compiono un moto noto con il termine: *moto di un proiettile*.

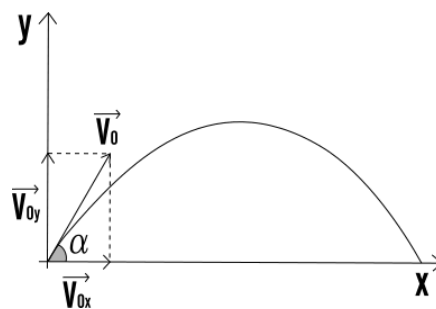


Figura 4. Moto di un proiettile

Il moto di un proiettile è dato dalla somma vettoriale di due differenti moti:

- un moto longitudinale, lungo l'asse **x**, a velocità costante;
- un moto trasversale, lungo l'asse **z**, uniformemente accelerato.

La combinazione di questi due moti fornisce un moto che nel piano **X-Z** presenta la caratteristica traiettoria parabolica come riportato in **Figura 4**. La gittata è definita come la distanza che separa il punto di lancio del corpo (o proiettile, qualsivoglia) e il punto in cui esso tocca terra.

Considerando dunque un piano cartesiano **X-Z** ed origine **O**, è possibile scrivere le seguenti equazioni, che rappresentano le componenti delle accelerazioni lungo gli assi **X** e **Z**:

$\begin{aligned}\ddot{x} &= 0 \\ \ddot{z} &= -g\end{aligned}$	Equazione 2
---	-------------

Dove:

- g è l'accelerazione di gravità, pari a circa 9,81 m/s².

Per quanto concerne le condizioni al contorno, il corpo è lanciato dall'origine degli assi con una velocità iniziale v_0 , inclinata rispetto all'asse **X** di un angolo θ , dunque con una componente lungo **X** e lungo **Z**, pari rispettivamente a:

$\begin{aligned}v_{0x} &= v_0 \cdot \cos\theta \\ v_{0z} &= v_0 \cdot \sin\theta\end{aligned}$	Equazione 3
--	-------------

A questo punto, integrando **l'Equazione 2** ed applicando le condizioni al contorno, è possibile ottenere la legge del moto:

$\begin{aligned}x(t) &= x_0 + v_{0x} \cdot t \\ z(t) &= z_0 + v_{0z} \cdot t - 1/2gt^2\end{aligned}$	Equazione 4
--	-------------

Ponendo $z = 0$ nella seconda **dell'Equazione 4** e scartando la soluzione negativa, è possibile ricavare il tempo al quale il corpo tocca terra. Sostituendo il tempo così ottenuto nella prima **dell'Equazione 4** è possibile calcolare la gittata **G**. Nel dettaglio:

$t _{z=0} = \frac{v_{0z}}{g} + \sqrt{\frac{v_{0z}^2 + 2 \cdot g \cdot z_0}{g}}$	Equazione 5
---	-------------

$G = x_0 + v_{0x} \cdot t _{z=0}$	Equazione 6
-----------------------------------	-------------

Note le equazioni del moto di un proiettile, è possibile specificare il problema per il caso in esame.

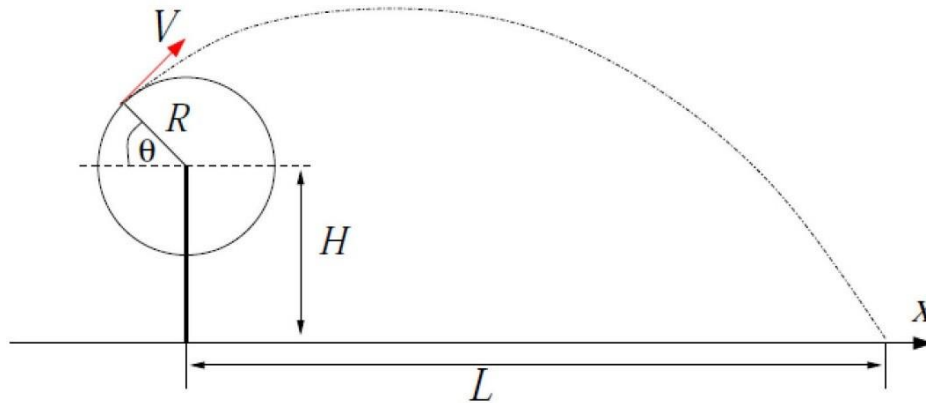


Figura 5. Rappresentazione della gittata massima della rottura accidentale di un organo rotante

Facendo riferimento allo schema dell'aerogeneratore di **Figura 5** e ponendo l'origine degli assi alla base dell'aerogeneratore, si ottengono le seguenti relazioni cinematiche del baricentro della pala prima della rottura della stessa:

$x = -R \cdot \cos(\omega t)$ $z = H + R \cdot \sin(\omega t)$	Equazione 7
--	-------------

Dove:

- $R = \sqrt{d^2 + l^2}$ è la distanza del baricentro della pala dal centro di rotazione;
- H è l'altezza del rotor HUB;
- ω è la velocità di rotazione.

Al fine di calcolare la velocità del baricentro della pala prima della rottura, è necessario derivare nel tempo l'**Equazione 7**, ottenendo:

$v_x = \frac{d(x)}{dt} = R \cdot \omega \cdot \sin(\omega t)$ $v_z = \frac{d(z)}{dt} = R \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)$	Equazione 8
---	-------------

Imponendo il tempo di rottura $t = \bar{t}$, dunque $\omega t = \omega \bar{t} = \theta$, è possibile calcolare le condizioni iniziali, posizione e velocità, del moto della pala.

Nel dettaglio, esse risultano essere eguali a:

$x_0 = -R \cdot \cos(\theta)$ $z_0 = -R \cdot \sin(\theta)$ $v_{x_0} = \frac{d(x)}{dt} = R \cdot \omega \cdot \sin(\theta)$ $v_{z_0} = \frac{d(z)}{dt} = R \cdot \omega \cdot \cos(\theta)$	<i>Equazione 9</i>
---	--------------------

Sostituendo le condizioni iniziali ottenute **nell'Equazione 5**, è possibile calcolare il tempo di volo della pala, cioè il tempo che intercorre tra il momento della rottura \bar{t} e il momento in cui tocca terra.

Nel dettaglio, risulta essere pari a:

$t _{z=0} = \frac{R \cdot \omega \cdot \cos(\theta)}{g} + \sqrt{\frac{R^2 + \omega^2 \cdot \cos^2(\theta) + 2 \cdot g(H + R \cdot \sin(\theta))}{g}}$	<i>Equazione 10</i>
---	---------------------

Infine, sostituendo $t|_{z=0}$ ricavato **nell'Equazione 10**, all'interno della prima **nell'Equazione 4**, si ricava la gittata della pala **G**:

$G = -R \cdot \cos(\theta) + R \cdot \omega \cdot \sin(\theta) \cdot \frac{1}{g} \left[R \cdot \omega \cdot \cos(\theta) + \sqrt{R^2 + \omega^2 \cdot \cos^2(\theta) + 2g(H + R \cdot \sin(\theta))} \right]$	<i>Equazione 11</i>
--	---------------------

L'Equazione 11 ci permette, note le caratteristiche geometriche (R, H) e cinematiche (m) dell'aerogeneratore di calcolare la gittata della pala. È importante notare che la gittata **G** è funzione dell'angolo θ che la pala presenta nel momento della rottura. Al fine di determinare quale sia l'angolo θ per il quale la gittata **G** è massima, si procede con il calcolo dei massimi e dei minimi ponendo a **0** la derivata della gittata rispetto all'angolo θ ; cioè:

$\frac{d(G)}{d\theta} = 0$	<i>Equazione 12</i>
----------------------------	---------------------

Che porta al seguente risultato:

$\frac{R\omega\cos(\theta)(2gH + 3gR\sin(\theta) - \omega^2R^2\sin^2(\theta) + \omega^2R^2\cos^2(\theta))}{2\sqrt{\omega^2R^2\cos^2(\theta) + 2g(H + R\sin(\theta))}} + \sin(\theta) \left[R - \frac{\omega^2R^2\sin^2(\theta)}{g} \right] + \frac{\omega^2R^2\cos^2(\theta)}{g} = 0$	<i>Equazione 13</i>
--	---------------------

Ricavando θ **dall'Equazione 12**, è possibile ottenere gli angoli di rottura della pala, per i quali si ottiene la gittata **G** massima.

8 RISULTATI DI CALCOLO

8.1 RAPPRESENTAZIONE CASO 1 E CASO 2

8.1.1 Caso 1 – Gittata delle pale per la velocità nominale del rotore (10,00 giri/min)

Sostituendo i dati a nostra disposizione riportati nella **Equazione 13**, è possibile ottenere i seguenti risultati:

$$\begin{aligned}\theta|_{G_{MAX}} &= 70,9^\circ && \text{per } x \text{ positivo} \\ \theta|_{G_{MAX}} &= 305,7^\circ && \text{per } x \text{ negativo}\end{aligned}$$

Sostituendo gli angoli θ così ottenuti nella **Equazione 11**, si ottengono le gittate massime sia per le x positive che negative (per il centro di gravità):

$$\theta|_{G_{MAX}} = 70,9^\circ \Rightarrow 173,56 \text{ m}$$

$$\theta|_{G_{MAX}} = 305,7^\circ \Rightarrow -173,56 \text{ m}$$

La seguente **Figura 6** mostra la traiettoria teorica della lama mozzata agli angoli 70,9 gradi (**linea blu**) e 305,7 gradi (**linea rossa**) rispetto al baricentro della pala; è quindi necessario aggiungere valori appropriati alle distanze mostrate per conoscere la vera portata massima della pala accidentalmente mozzata, come mostrato nei passaggi seguenti.

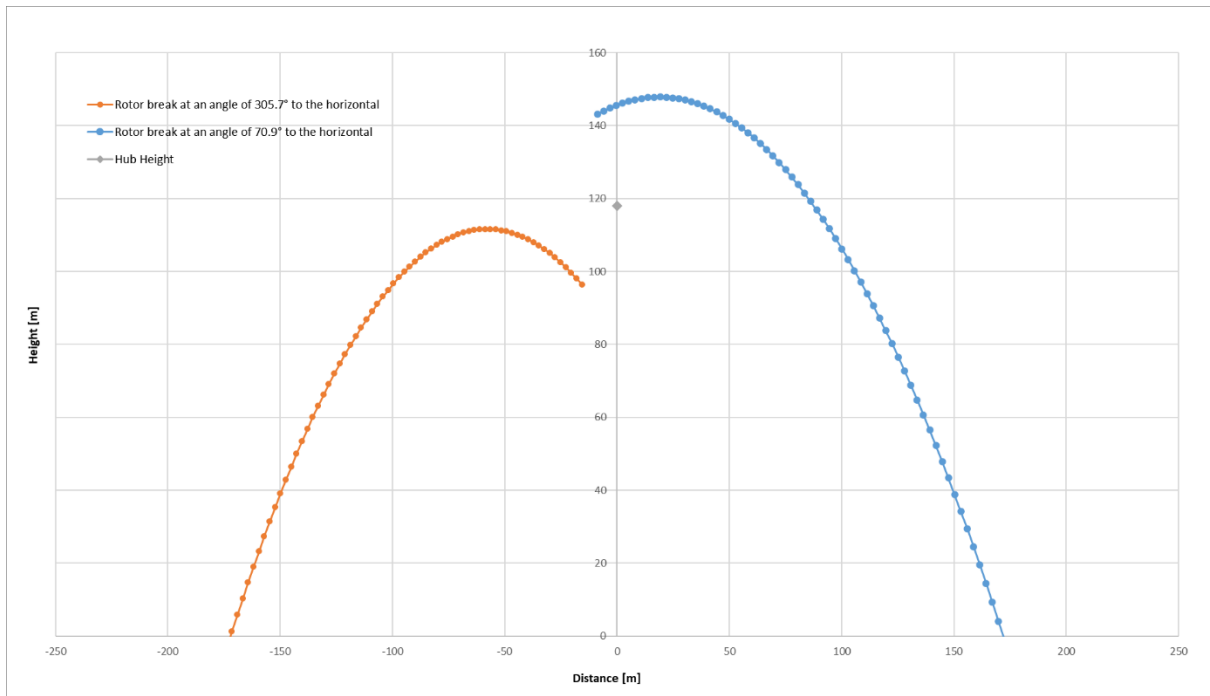


Figura 6 Traiettoria di volo della pala della turbina staccata (centro di gravità della pala)

Per ottenere la portata massima reale di una lama mozzata, è necessario aggiungere anche i 2/3 della lunghezza della lama (la distanza dal centro di gravità all'estremità della lama):

$$\theta|_{G_{MAX}} = 70,9^\circ \Rightarrow 173,56 + \frac{2}{3} \cdot 79,7 = 226,70 \text{ m}$$

$$\theta_{G_{MAX}} = 305,7^\circ \Rightarrow -173,56 - \frac{2}{3} \cdot 79,7 = -226,70 \text{ m}$$

La gittata massima teorica, ottenuta senza considerare alcun effetto correlato, risulta essere pari a 227m e rappresenta la distanza di maggior rischio nell'intorno del singolo aerogeneratore in caso di evento calamitoso.

La seguente **Tabella 2** mostra le distanze massime che una banderuola mozzata potrebbe percorrere, considerata rispetto alle varie angolazioni corrispondenti (intervallo di 5 gradi), oltre a descrivere la gittata rispetto al baricentro e la gittata massima raggiungibile dalla banderuola.

Gradi - θ	Radiani - θ	Sin(θ)	Cos(θ)	Gittata	Gittata massima	Gradi - θ	Radiani - θ	Sin(θ)	Cos(θ)	Gittata	Gittata massima
°	-	-	-	m	m	°	-	-	-	m	m
0	0	0	1	-28,22	24,92	185	3,228859116	-0,087155743	-0,996194698	21,14	-31,99
5	0,087266463	0,087155743	0,996194698	-5,48	47,65	190	3,316125579	-0,173648178	-0,984807753	14,05	-39,08
10	0,174532925	0,173648178	0,984807753	17,25	70,39	195	3,403392041	-0,258819045	-0,965925826	6,91	-46,23
15	0,261799388	0,258819045	0,965925826	39,54	92,68	200	3,490658504	-0,342020143	-0,939692621	-0,32	-53,45
20	0,34906585	0,342020143	0,939692621	60,98	114,12	205	3,577924967	-0,422618262	-0,906307787	-7,67	-60,80
25	0,436332313	0,422618262	0,906307787	81,19	134,32	210	3,665191429	-0,5	-0,866025404	-15,17	-68,30
30	0,523598776	0,5	0,866025404	99,83	152,96	215	3,752457892	-0,573576436	-0,819152044	-22,87	-76,00
35	0,610865238	0,573576436	0,819152044	116,62	169,75	220	3,839724354	-0,64278761	-0,766044443	-30,80	-83,93
40	0,698131701	0,64278761	0,766044443	131,34	184,47	225	3,926990817	-0,707106781	-0,707106781	-39,00	-92,14
45	0,785398163	0,707106781	0,707106781	143,84	196,98	230	4,01425728	-0,766044443	-0,64278761	-47,51	-100,64
50	0,872664626	0,766044443	0,64278761	154,04	207,17	235	4,101523742	-0,819152044	-0,573576436	-56,35	-109,49
55	0,959931089	0,819152044	0,573576436	161,91	215,04	240	4,188790205	-0,866025404	-0,5	-65,55	-118,68
60	1,047197551	0,866025404	0,5	167,50	220,63	245	4,276056667	-0,906307787	-0,422618262	-75,10	-128,23
65	1,134464014	0,906307787	0,422618262	170,89	224,03	250	4,36332313	-0,939692621	-0,342020143	-84,99	-138,12
70	1,221730476	0,939692621	0,342020143	172,25	225,38	255	4,450589593	-0,965925826	-0,258819045	-95,17	-148,30
75	1,308996939	0,965925826	0,258819045	171,75	224,88	260	4,537856055	-0,984807753	-0,173648178	-105,55	-158,68
80	1,396263402	0,984807753	0,173648178	169,60	222,73	265	4,625122518	-0,996194698	-0,087155743	-116,01	-169,14
85	1,483529864	0,996194698	0,087155743	166,02	219,15	270	4,71238898	-1	-1,83772E-16	-126,36	-179,49
90	1,570796327	1	6,12574E-17	161,25	214,38	275	4,799655443	-0,996194698	0,087155743	-136,36	-189,50
95	1,658062789	0,996194698	-0,087155743	155,50	208,63	280	4,886921906	-0,984807753	0,173648178	-145,76	-198,89
100	1,745329252	0,984807753	-0,173648178	148,99	202,12	285	4,974188368	-0,965925826	0,258819045	-154,23	-207,36
105	1,832595715	0,965925826	-0,258819045	141,90	195,03	290	5,061454831	-0,939692621	0,342020143	-161,44	-214,57
110	1,919862177	0,939692621	-0,342020143	134,40	187,53	295	5,148721293	-0,906307787	0,422618262	-167,06	-220,19
115	2,00712864	0,906307787	-0,422618262	126,63	179,77	300	5,235987756	-0,866025404	0,5	-170,76	-223,90
120	2,094395102	0,866025404	-0,5	118,71	171,85	305	5,323254219	-0,819152044	0,573576436	-172,27	-225,40
125	2,181661565	0,819152044	-0,573576436	110,73	163,86	310	5,410520681	-0,766044443	0,64278761	-171,35	-224,48
130	2,268928028	0,766044443	-0,64278761	102,75	155,89	315	5,497787144	-0,707106781	0,707106781	-167,82	-220,95
135	2,35619449	0,707106781	-0,707106781	94,84	147,97	320	5,585053606	-0,64278761	0,766044443	-161,59	-214,73
140	2,443460953	0,64278761	-0,766044443	87,01	140,14	325	5,672320069	-0,573576436	0,819152044	-152,65	-205,78
145	2,530727415	0,573576436	-0,819152044	79,29	132,43	330	5,759586532	-0,5	0,866025404	-141,04	-194,18
150	2,617993878	0,5	-0,866025404	71,70	124,83	335	5,846852994	-0,422618262	0,906307787	-126,92	-180,06
155	2,705260341	0,422618262	-0,906307787	64,22	117,36	340	5,934119457	-0,342020143	0,939692621	-110,50	-163,64
160	2,792526803	0,342020143	-0,939692621	56,86	110,00	345	6,021385919	-0,258819045	0,965925826	-92,06	-145,19
165	2,879793266	0,258819045	-0,965925826	49,60	102,73	350	6,108652382	-0,173648178	0,984807753	-71,93	-125,07
170	2,967059728	0,173648178	-0,984807753	42,42	95,55	355	6,195918845	-0,087155743	0,996194698	-50,51	-103,65
175	3,054326191	0,087155743	-0,996194698	35,30	88,43	360	6,283185307	-2,4503E-16	1	-28,22	-81,35
180	3,141592654	1,22515E-16	-1	28,22	81,35	-	-	-	-	-	-

Tabella 3 Gittata della pala per diversi angoli di rottura

La **Figura 7** mostra la relazione tra l'angolo di rottura della pala e la distanza di volo della stessa.

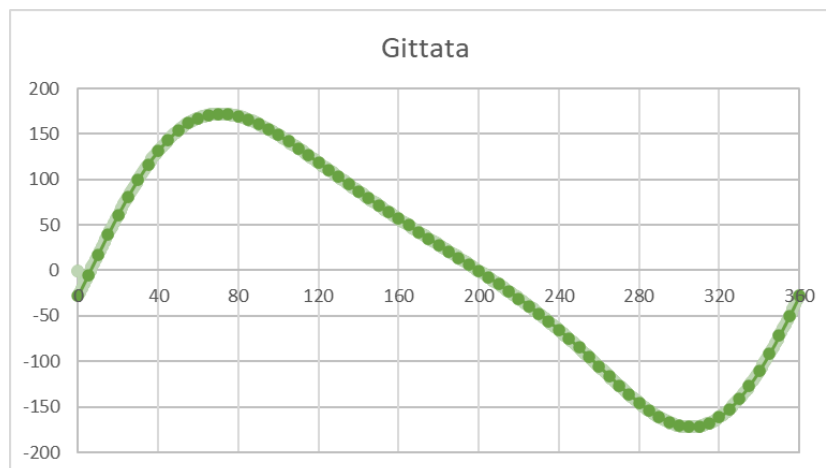


Figura 7 Gittata della pala per diversi angoli di rottura

Tenendo conto dei calcoli e dei grafici di cui sopra, si può concludere che la gittata massima della pala staccata, ruotante alla velocità di 10 giri/minuto, è pari a 173,56 m; dato riscontrabile per i due angoli 70,9 gradi e 305,7 gradi.

Questa distanza è calcolata rispetto al baricentro della pala, perciò ad essa vanno aggiunti i 2/3 della lunghezza della pala per ottenere la distanza massima per il punto più esterno.

Pertanto, la distanza massima da considerare per determinare la zona di potenziale pericolo è pari a **226,7 m**.

8.1.2 Caso 2 - Gittata delle pale per la massima velocità del rotore con riduzione del 30% (8,12 giri/min)

Sostituendo i dati a nostra disposizione, riportati nel **paragrafo 2.1**, nella **Equazione 13**, è possibile ottenere i seguenti risultati:

$$\begin{aligned}\theta|_{G_{MAX}} &= 77,4^\circ && \text{per } x \text{ positive} \\ \theta|_{G_{MAX}} &= 304,7^\circ && \text{per } x \text{ negative}\end{aligned}$$

Sostituendo gli angoli θ così ottenuti nella **Equazione 11**, si ottengono le gittate massime sia per le x positive che negative (per il centro di gravità):

$$\begin{aligned}\theta|_{G_{MAX}} = 77,4^\circ &\Rightarrow 135,35 \text{ m} \\ \theta|_{G_{MAX}} = 304,7^\circ &\Rightarrow -135,35 \text{ m}\end{aligned}$$

La seguente **Figura 8** mostra la traiettoria teorica della lama mozzata agli angoli 77,4 gradi (**linea blu**) e 304,7 gradi (**linea rossa**) rispetto al baricentro della pala; è quindi necessario aggiungere valori appropriati alle distanze mostrate per conoscere la vera portata massima della pala accidentalmente mozzata, come mostrato nei passaggi seguenti.

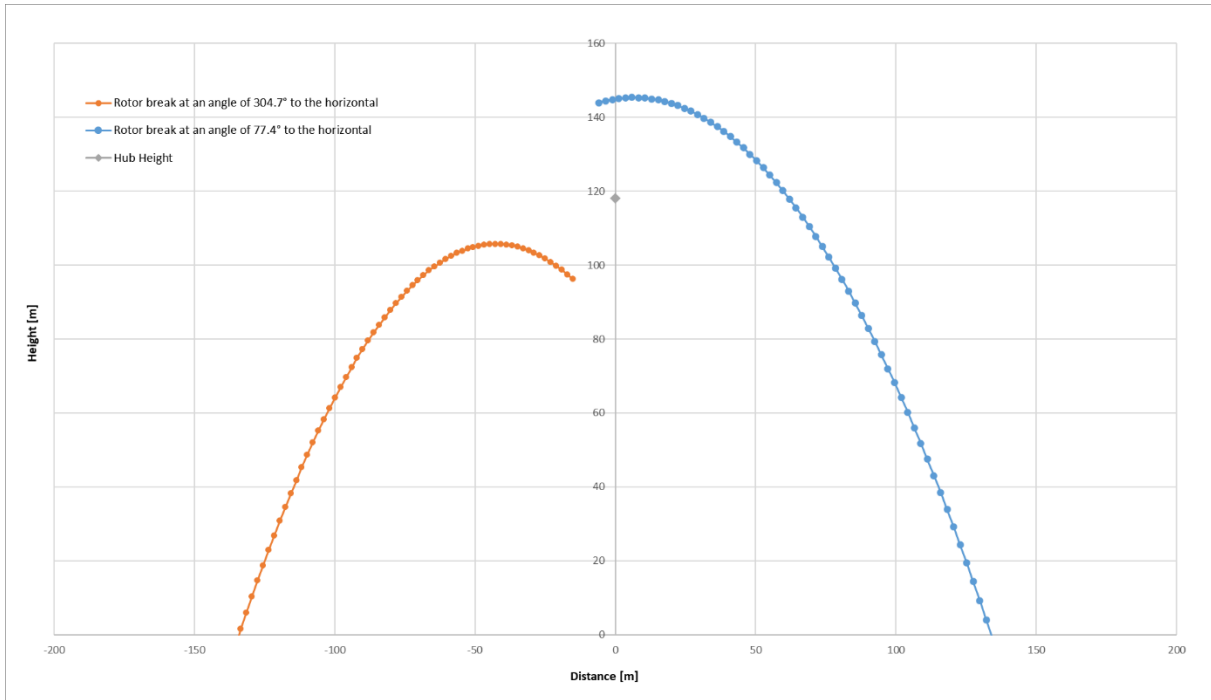


Figura 8 Traiettoria di volo della pala della turbina staccata (centro di gravità della pala)

Per ottenere la portata massima reale di una lama mozzata, è necessario aggiungere anche i 2/3 della lunghezza della lama (la distanza dal centro di gravità all'estremità della lama):

$$\theta|_{G_{MAX}} = 77,4^\circ \Rightarrow 135,35 + \frac{2}{3} \cdot 79,7 = \mathbf{188,48 \text{ m}}$$

$$\theta|_{G_{MAX}} = 304,7^\circ \Rightarrow -135,35 - \frac{2}{3} \cdot 79,7 = \mathbf{-188,48 \text{ m}}$$

La potenziale gittata massima ottenuta risulta essere pari a 189m e rappresenta la distanza di maggior rischio nell'intorno del singolo aerogeneratore in caso di evento calamitoso.

La seguente **Tabella 3** mostra le distanze massime che una banderuola mozzata potrebbe percorrere, considerata rispetto alle varie angolazioni corrispondenti (intervallo di 5 gradi), oltre a descrivere la gittata rispetto al baricentro e la gittata massima raggiungibile dalla banderuola.

RTS09 – ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA ROTTURA ACCIDENTALE DEGLI ORGANI ROTANTI

Gradi - θ	Radiani - θ	Sin(θ)	Cos(θ)	Gittata	Gittata massima	Gradi - θ	Radiani - θ	Sin(θ)	Cos(θ)	Gittata	Gittata massima
°	-	-	-	m	m	°	-	-	-	m	m
0	0	0	1	-28,22	24,92	185	3,228859116	-0,087155743	-0,996194698	21,85	-31,28
5	0,087266463	0,087155743	0,996194698	-11,48	41,65	190	3,316125579	-0,173648178	-0,984807753	15,44	-37,69
10	0,174532925	0,173648178	0,984807753	5,37	58,50	195	3,403392041	-0,258819045	-0,965925826	8,98	-44,15
15	0,261799388	0,258819045	0,965925826	22,03	75,16	200	3,490658504	-0,342020143	-0,939692621	2,45	-50,68
20	0,34906585	0,342020143	0,939692621	38,21	91,35	205	3,577924967	-0,422618262	-0,906307787	-4,18	-57,31
25	0,436332313	0,422618262	0,906307787	53,67	106,80	210	3,665191429	-0,5	-0,866025404	-10,92	-64,05
30	0,523598776	0,5	0,866025404	68,15	121,29	215	3,752457892	-0,573576436	-0,819152044	-17,80	-70,93
35	0,610865238	0,573576436	0,819152044	81,47	134,60	220	3,839724354	-0,64278761	-0,766044443	-24,82	-77,96
40	0,698131701	0,64278761	0,766044443	93,44	146,57	225	3,926990817	-0,707106781	-0,707106781	-32,02	-85,15
45	0,785398163	0,707106781	0,707106781	103,94	157,08	230	4,01425728	-0,766044443	-0,64278761	-39,40	-92,53
50	0,872664626	0,766044443	0,64278761	112,90	166,04	235	4,101523742	-0,819152044	-0,573576436	-46,96	-100,09
55	0,959931089	0,819152044	0,573576436	120,27	173,40	240	4,188790205	-0,866025404	-0,5	-54,70	-107,83
60	1,047197551	0,866025404	0,5	126,03	179,17	245	4,276056667	-0,906307787	-0,422618262	-62,60	-115,74
65	1,134464014	0,906307787	0,422618262	130,24	183,38	250	4,36332313	-0,939692621	-0,342020143	-70,64	-123,77
70	1,221730476	0,939692621	0,342020143	132,95	186,09	255	4,450589593	-0,965925826	-0,258819045	-78,75	-131,88
75	1,308996939	0,965925826	0,258819045	134,26	187,39	260	4,537856055	-0,984807753	-0,173648178	-86,85	-139,99
80	1,396263402	0,984807753	0,173648178	134,27	187,40	265	4,625122518	-0,996194698	-0,087155743	-94,85	-147,98
85	1,483529864	0,996194698	0,087155743	133,12	186,25	270	4,71238898	-1	-1,83772E-16	-102,60	-155,73
90	1,570796327	1	6,12574E-17	130,93	184,07	275	4,799655443	-0,996194698	0,087155743	-109,95	-163,08
95	1,658062789	0,996194698	-0,087155743	127,86	180,99	280	4,886921906	-0,984807753	0,173648178	-116,70	-169,84
100	1,745329252	0,984807753	-0,173648178	124,02	177,15	285	4,974188368	-0,965925826	0,258819045	-122,66	-175,80
105	1,832595715	0,965925826	-0,258819045	119,55	172,68	290	5,061454831	-0,939692621	0,342020143	-127,62	-180,75
110	1,919862177	0,939692621	-0,342020143	114,57	167,70	295	5,148721293	-0,906307787	0,422618262	-131,36	-184,49
115	2,00712864	0,906307787	-0,422618262	109,18	162,32	300	5,235987756	-0,866025404	0,5	-133,68	-186,82
120	2,094395102	0,866025404	-0,5	103,48	156,62	305	5,323254219	-0,819152044	0,573576436	-134,41	-187,55
125	2,181661565	0,819152044	-0,573576436	97,55	150,68	310	5,410520681	-0,766044443	0,64278761	-133,40	-186,54
130	2,268928028	0,766044443	-0,64278761	91,44	144,58	315	5,497787144	-0,707106781	0,707106781	-130,55	-183,68
135	2,35619449	0,707106781	-0,707106781	85,23	138,36	320	5,585053606	-0,64278761	0,766044443	-125,79	-178,92
140	2,443460953	0,64278761	-0,766044443	78,94	132,07	325	5,672320069	-0,573576436	0,819152044	-119,11	-172,25
145	2,530727415	0,573576436	-0,819152044	72,61	125,74	330	5,759586532	-0,5	0,866025404	-110,56	-163,70
150	2,617993878	0,5	-0,866025404	66,26	119,39	335	5,846852994	-0,422618262	0,906307787	-100,23	-153,37
155	2,705260341	0,422618262	-0,906307787	59,91	113,04	340	5,934119457	-0,342020143	0,939692621	-88,26	-141,40
160	2,792526803	0,342020143	-0,939692621	53,56	106,70	345	6,021385919	-0,258819045	0,965925826	-74,84	-127,97
165	2,879793266	0,258819045	-0,965925826	47,22	100,36	350	6,108652382	-0,173648178	0,984807753	-60,18	-113,32
170	2,967059728	0,173648178	-0,984807753	40,89	94,03	355	6,195918845	-0,087155743	0,996194698	-44,55	-97,68
175	3,054326191	0,087155743	-0,996194698	34,56	87,69	360	6,283185307	-2,4503E-16	1	-28,22	-81,35
180	3,141592654	1,22515E-16	-1	28,22	81,35	-	-	-	-	-	-

Tabella 4. Gittata della pala per diversi angoli di rottura

La **Figura 9** mostra la relazione tra l'angolo di rottura della pala e la distanza di volo della stessa.

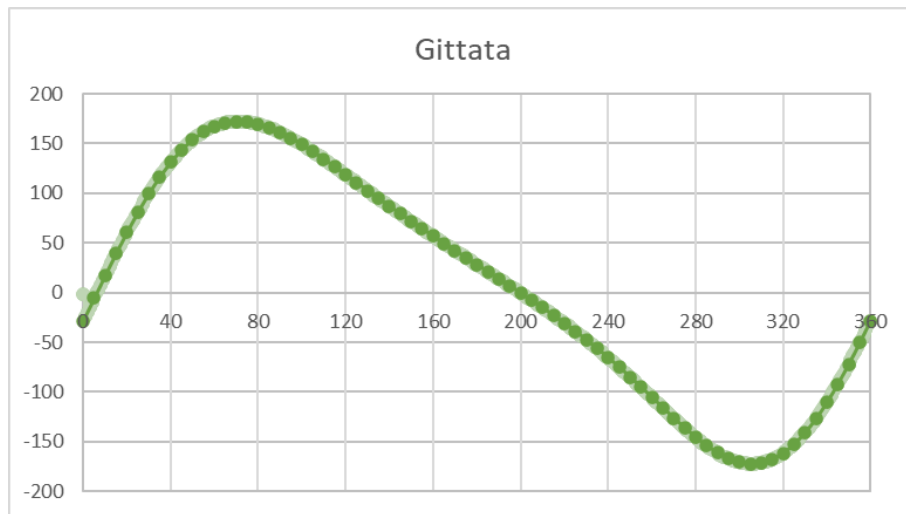


Figura 9 Gittata della pala per diversi angoli di rottura

Tenendo conto dei calcoli e dei grafici di cui sopra, si può concludere che la gittata massima della pala staccata, ruotante ad una velocità pari a 8,12 giri/minuto, è pari a 135,35 m; dato riscontrabile per i due angoli 77,4 gradi e 304,7 gradi.

Questa distanza è calcolata rispetto al baricentro della pala, perciò ad essa vanno aggiunti i 2/3 della lunghezza della pala per ottenere la distanza massima per il punto più esterno.

Pertanto, la distanza massima da considerare per determinare la zona di potenziale pericolo è pari a **188,48 m**.

Al fine di predisporre le analisi più rappresentative, verranno proposte nei seguenti paragrafi due opzioni, cosiddette **Worst Case** e **Real Case**, al fine di individuare puntualmente i potenziali pericoli legati all'accidentale distacco di un elemento rotante.

8.2 VALUTAZIONE DEL WORST CASE

Il presente studio si prefigge lo scopo di valutare la rischiosità del potenziale incidente derivante dalla rottura accidentale degli organi rotanti nel caso di specie del **Parco Eolico Luogosanto**.

A tal proposito, viene di seguito illustrata l'opzione **Worst Case**, la quale evidenzia il massimo rischio derivante dall'operatività delle macchine a piena potenza, senza considerare nessuna variabile legata all'aerodinamica e alle forze che interagirebbero con il corpo distaccato.

Tale situazione non è rappresentativa di una situazione realistica che verrà di seguito illustrata nel paragrafo "**8.3 Valutazione del Real Case**", ma vuole essere un'analisi ulteriormente cautelativa a favore di sicurezza del progetto.

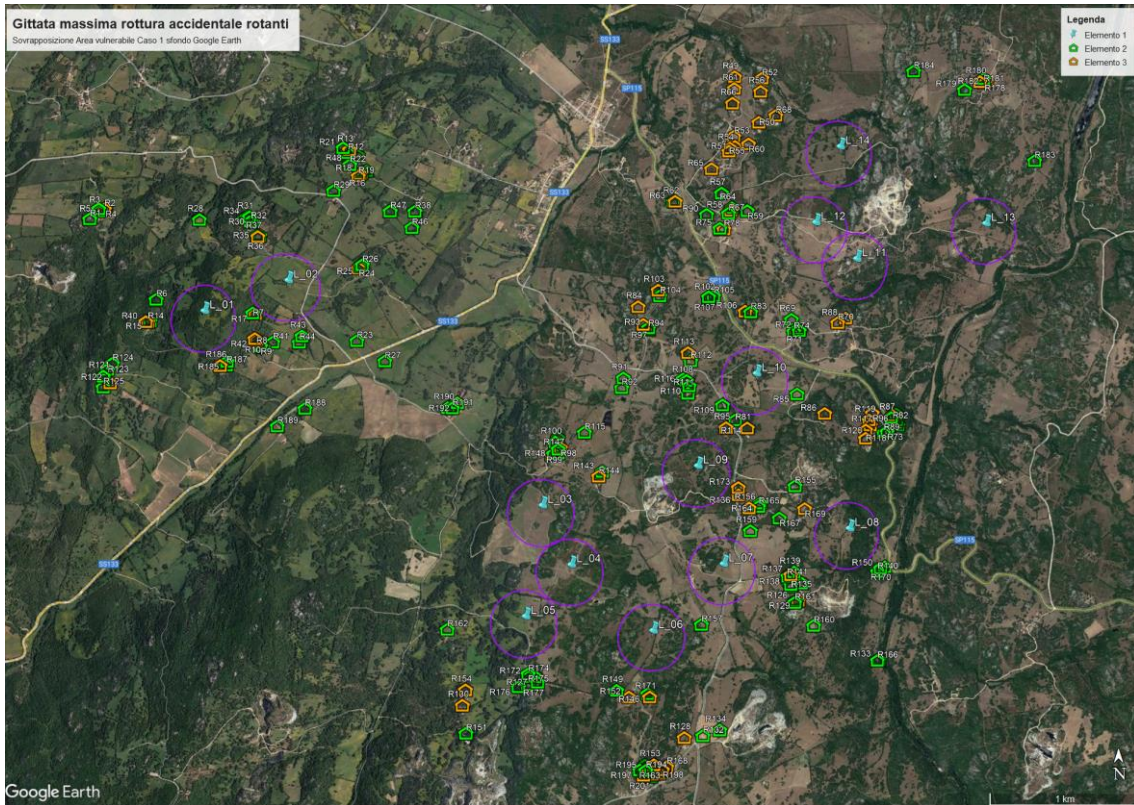


Figura 10. Inquadramento layout di progetto su sfondo Google Earth con sovrapposizione area vulnerabile – Worst Case (10 m/s)

Anche considerando la situazione peggiore, si evince che il progetto non intacca nessuno dei ricettori presenti nell’area di impianto, garantendo all’impianto il massimo livello di sicurezza.

8.3 VALUTAZIONE DEL REAL CASE

Al fine di valutare la potenziale incidenza della rischiosità derivante dalla rottura accidentale degli organi rotanti nel caso di specie, viene di seguito proposto il caso più rappresentativo relativo al Worst Case. A tal fine, vengono evidenziati nella seguente **Figura 11** i potenziali recettori sensibili dell’area di impianto al fine di valutarne la vulnerabilità.

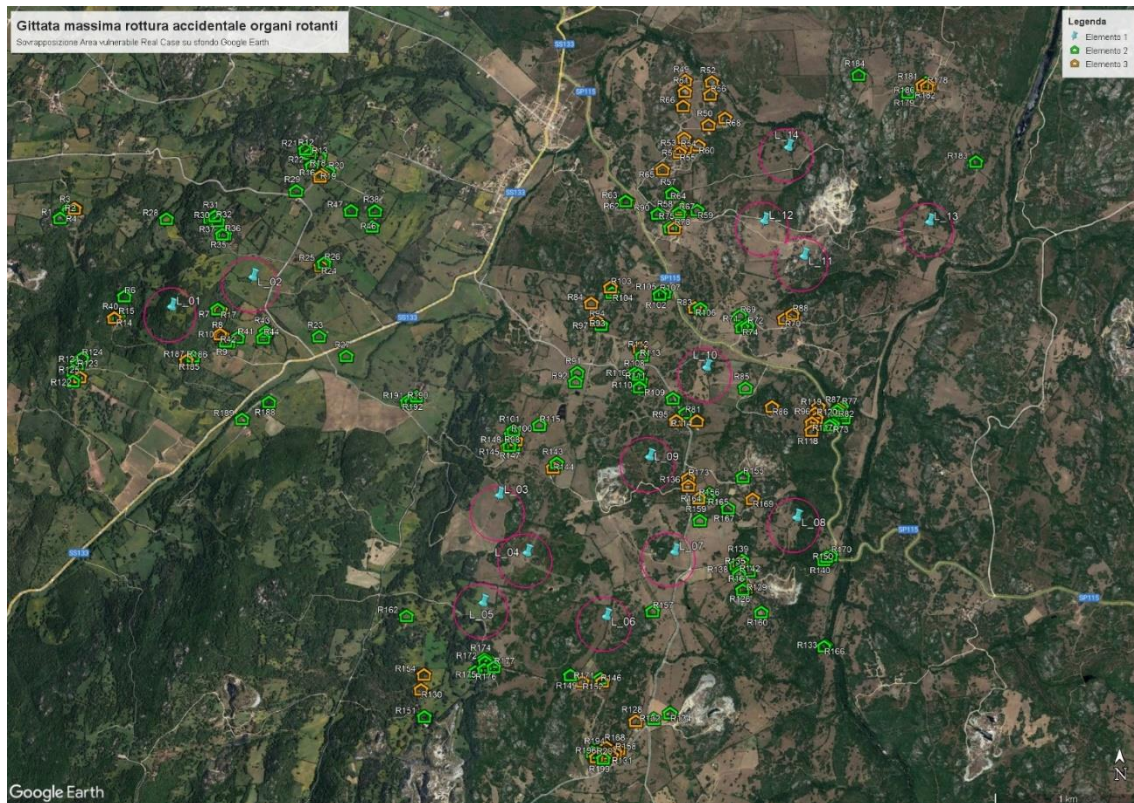


Figura 11. Inquadramento layout di progetto su sfondo Google Earth con sovrapposizione area vulnerabile - Real Case

Dall'analisi della figura sopra esposta si evince chiaramente che nessuno dei recettori si trova nell'area di rischio da distacco delle pale dell'aerogeneratore; considerazione valevole sia per gli edifici catastalmente individuati come edifici residenziali, sia per quelli non residenziali.

Tale considerazione conferisce al progetto un elevato livello di sicurezza nell'ambiente in cui è stato inserito, non comportando rischi significativi per le abitazioni sparse nell'area di impianto.

8.4 STRADE

Come evidenziato dalla precedente **“Figura 11. Inquadramento layout di progetto su sfondo Google Earth con sovrapposizione area vulnerabile - Real Case”**, anche la strada comunale che collega la **SP133** e **Loc. Santu Jaccu**, si trova all'interno del buffer di rischio dell'evento calamitoso afferente l'aerogeneratore **L_02**.

Seppur in maniera marginale, tale aerogeneratore **L_02** potrebbe impattare sul percorso stradale, ponendo un discorso relativo alla sicurezza del traffico ivi potenzialmente in transito.

Tale livello di rischio può essere certamente attenuato guardando alla concreta operatività degli aerogeneratori sulla base dei dati vento disponibili e consultabili all'elaborato **“RTS07 - Studio anemologico e produzione energetica”** allegato alla presente progettazione.

Infatti, nell'area di impianto del **Parco Eolico Luogosanto** il vento spira con costanza, in particolare provenendo dalla direzione Ovest. Per questo motivo, gli aerogeneratori saranno orientati per lo più perpendicolari rispetto alla direttrice principale del vento. L'orientamento degli aerogeneratori risulta evidente dalle seguenti **Figure**, dove risulta evidente come l'asse di rotazione abbia orientamento Nord-Sud;

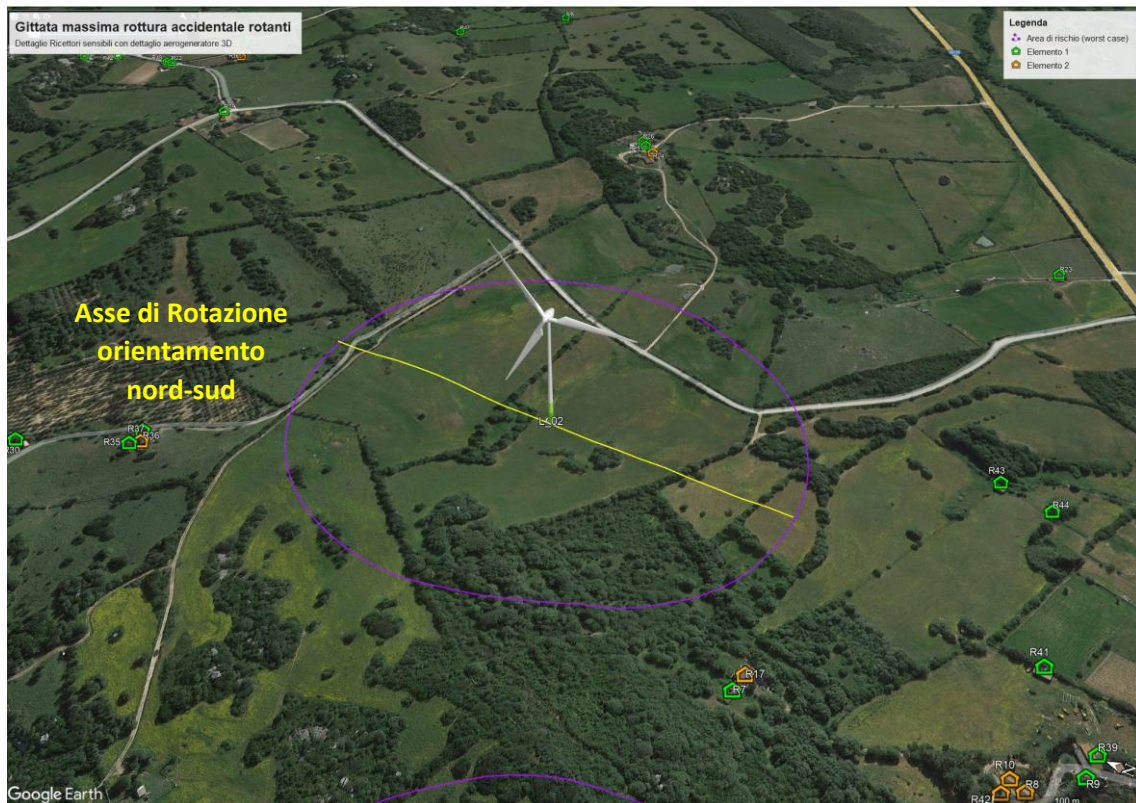


Figura 12. Dettaglio aerogeneratore L_02, con indicazione dell'asse di rotazione delle pale (Worst Case)

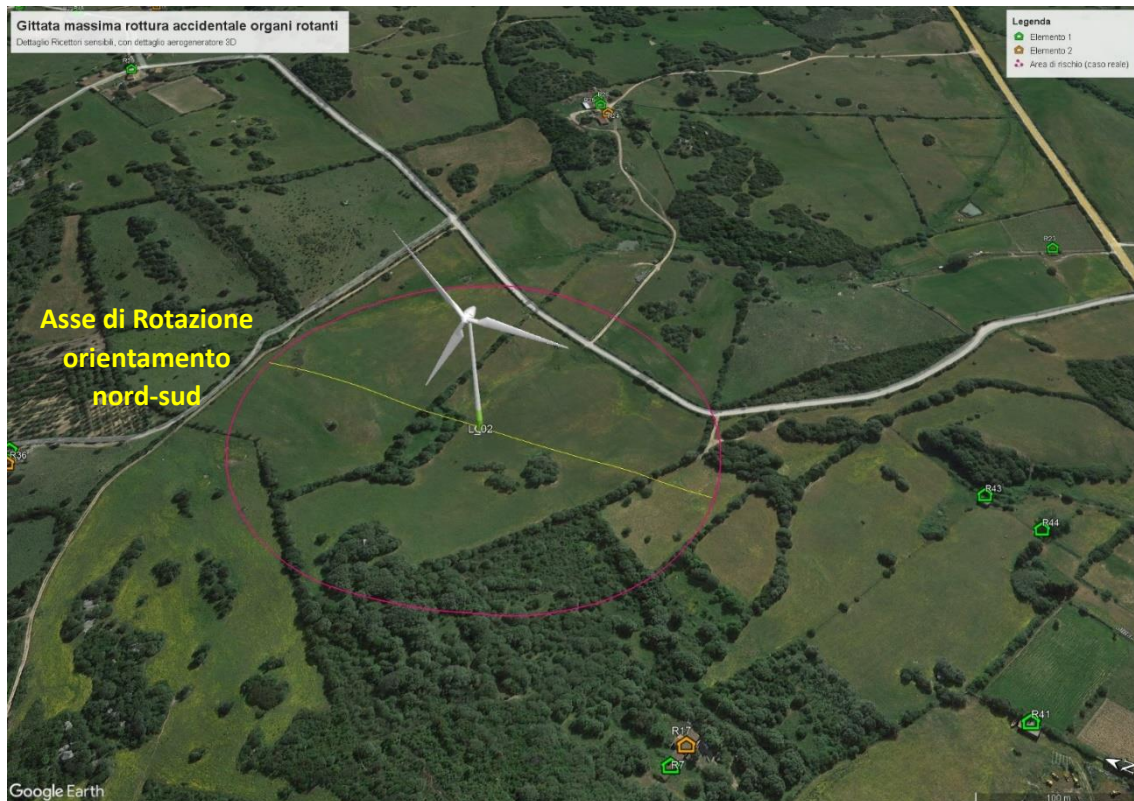


Figura 13. Dettaglio aerogeneratore L_02, con indicazione dell'asse di rotazione delle pale (Real Case)

Dalle figure **Figura 12** e **Figura 13** si nota come, in entrambi i casi – Worst Case e Real Case – il buffer di sicurezza interseca la strada in direzione Loc. Santu Jaccu. In questo caso, il piano di operatività dell'aerogeneratore, direzionato ad ovest per intercettare il vento battente sul sito, riduce sensibilmente il potenziale rischio di calamità per il transito sulla strada, essendo pressoché parallelo rispetto alla direzione stradale.

Le medesime considerazioni possono essere riprese per l'aerogeneratore **L_07** e **L_10**, rispettivamente rappresentati in **Figura 14** e **Figura 15**.

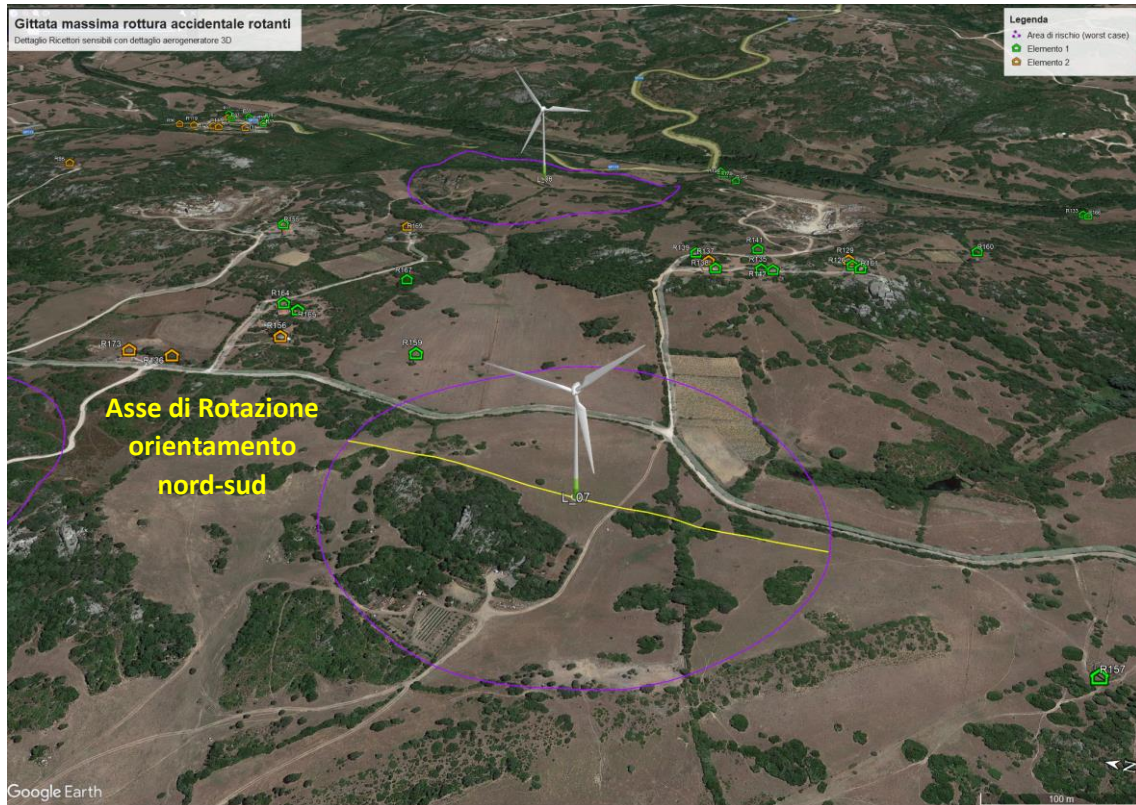


Figura 14. Dettaglio aerogeneratore L_07, con indicazione dell'asse di rotazione delle pale (Worst case)

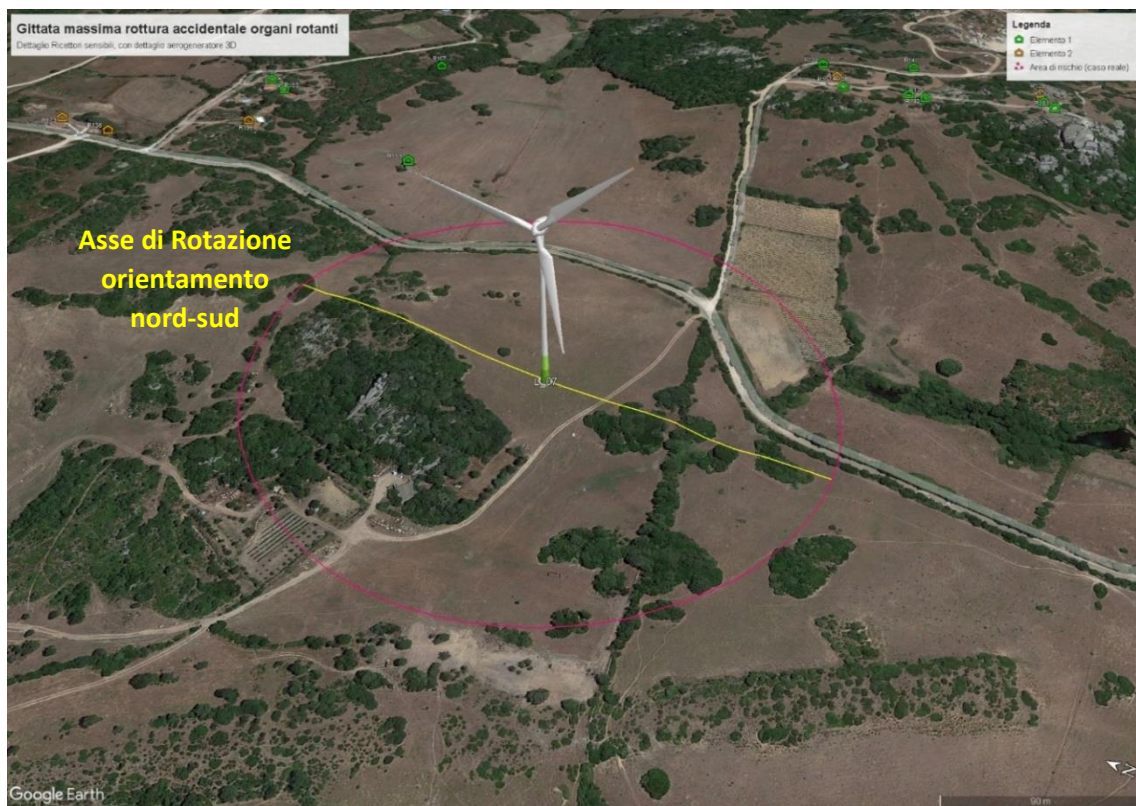


Figura 15. Dettaglio aerogeneratore L_07, con indicazione dell'asse di rotazione delle pale (Real Case)

In riferimento all'aerogeneratore **L_07**, il Proponente ha cercato di minimizzare il rischio potenziale, posizionando l'Aerogeneratore quanto più distante dalla strada esistente, compatibilmente con le distanze interne minime richieste tra gli aerogeneratori di progetto.

In aiuto alla scrivente viene la conformazione del percorso stradale, che asseconda il buffer di sicurezza. Anche in questo caso, il rischio potenziale di intercetto sulla strada è limitato dal piano di operatività della macchina, che è parallelo al tratto di strada agli estremi del buffer di interesse riducendo la potenziale rischiosità legata all'aerogeneratore **L_07**.

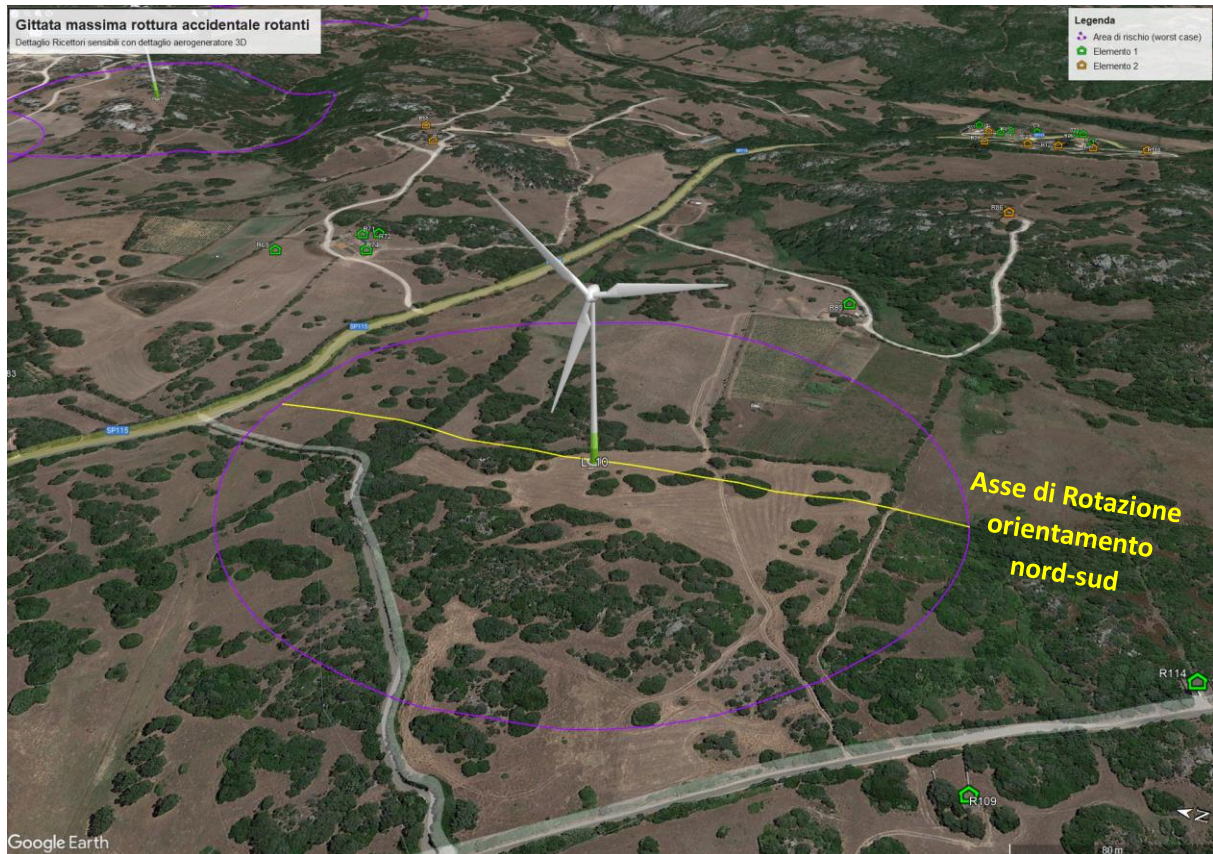


Figura 16. Dettaglio aerogeneratore L_10, con indicazione dell'asse di rotazione delle pale (Worst Case)



Figura 17. Dettaglio aerogeneratore L_10, con indicazione dell'asse di rotazione delle pale (Real Case)

Ancora, analizzando la situazione di cui all'aerogeneratore **L_10** come rappresentato nelle precedenti **Figura 16** e **Figura 17**, il buffer di sicurezza interseca una strada secondaria di raccordo tra la **SP115** e la strada in direzione Loc. Lu Mocu.

Come per le precedenti analisi puntuali, viene evidenziato l'asse di operatività della turbina, che limita il rischio potenziale di evento calamitoso derivante da possibile rottura accidentale di elemento rotante.

Senza dubbio, si prefigura in questo caso una situazione di rischio maggiore rispetto alle fattispecie precedenti, che la società costruttrice dovrà attenzionare con particolare impegno predisponendo i dovuti piani di manutenzione delle parti componenti degli aerogeneratori secondo i migliori standard proposti dal produttore delle turbine.

9 CONCLUSIONI

Il presente studio si prefigge lo scopo di valutare la rischiosità della potenziale rottura accidentale degli organi rotanti nel caso di specie del **Parco Eolico Luogosanto**.

La rottura accidentale di un elemento rotante, con eventuale lancio di elementi a distanza dagli aerogeneratori di progetto, ha una probabilità di accadimento remota, seppur non trascurabile data la dimensione del progetto.

La gittata dell'elemento che si suppone possa distaccarsi dall'aerogeneratore è stata ipotizzata e calcolata sia nel caso **Worst Case**, condizione estremamente generalista e sfavorevole – che trova poca rispondenza con la realtà dell'evento fisico in analisi – sia nel caso **Real Case**, applicando alcune semplici considerazioni derivanti dalla contestualizzazione dell'evento e riportando, quindi, le ipotesi di calcolo quanto più vicine alla realtà.

I risultati dello studio **Real Case** hanno portato alla definizione di un'area di potenziale impatto pari a 189 metri di distanza dal singolo aerogeneratore e, perciò, ad una distanza di sicurezza sufficientemente ampia rispetto sia ai ricettori sensibili individuati nell'area, sia all'asse stradale più vicino.

Nell'ottica di una ulteriore riduzione dei rischi connessi a tale ipotetico evento calamitoso, la società proprietaria del **Parco Eolico Luogosanto** adotterà i migliori standard in termini di manutenzione e cura degli aerogeneratori in ogni loro elemento meccanico ed elettromeccanico, al fine di mantenere il Parco Eolico Luogosanto nelle migliori condizioni di operatività e sicurezza.